

Dwujęzyczny mózg: przegląd najważniejszych doniesień

Bilingual brain: a review of the most important findings

Agata Wolna, Zofia Wodniecka

Laboratorium Psychologii Języka i Dwujęzyczności, Instytut Psychologii, Uniwersytet Jagielloński, Kraków

Neuropsychiatria i Neuropsychologia 2022; 17, 1–2: 66–73

Adres do korespondencji:

Agata Wolna
Laboratorium Psychologii Języka i Dwujęzyczności
Instytut Psychologii, Uniwersytet Jagielloński
ul. Ingardena 6, 30-060 Kraków
e-mail: agata.wolna@doctoral.uj.edu.pl

Streszczenie

Posługiwanie się więcej niż jednym językiem wiąże się z dodatkowymi wyzwaniem dla systemu poznawczego. Badania neuroobrazowe pokazują, że dwujęzyczność niesie za sobą szereg neuroplastycznych zmian zarówno w funkcjonowaniu, jak i strukturze mózgu. Zmiany te są związane z koniecznością pogodzenia dwóch systemów reprezentacji językowych oraz zaangażowania systemu kontroli, dzięki czemu osoba dwujęzyczna używa języka zgodnego z intencją czy kontekstem. Artykuł jest przeglądem najważniejszych doniesień badawczych w tym zakresie. Badania neuroobrazowe wskazują, że sposób organizacji neuronalnego podłoża reprezentacji językowych zależy od ich typu. Reprezentacje konceptualne u osób dwujęzycznych mają wspólne podłoże neuronalne. Reprezentacje leksykalne, związane ze słownictwem, chociaż są przetwarzane przez te same obszary mózgu niezależnie od języka, są kodowane przez częściowo odrębne populacje neuronów. Reorganizacja systemu reprezentacji syntaktycznych drugiego języka w dużej mierze zależy od czynników związanych z indywidualnym doświadczeniem dwujęzyczności, takich jak wiek, w którym rozpoczęto naukę języka, czy osiągnięty poziom biegłości. Neuroplastyczne zmiany w mózgu osoby dwujęzycznej, zarówno funkcjonalne, jak i strukturalne, następują również w wyniku zwiększonego zaangażowania kontroli poznawczej w procesy językowe. Najnowsze doniesienia wskazują jednak, że zakres oraz nasilenie tych zmian zależą w dużej mierze od indywidualnego doświadczenia osoby dwujęzycznej.

Słowa kluczowe: dwujęzyczność, neuroplastyczność, sieć językowa, kontrola językowa.

Wstęp

Mózg człowieka cechuje wysoki stopień neuroplastyczności. Oznacza to, że zarówno struktura, jak i połączenia między poszczególnymi obszarami są wrażliwe, a przez to kształtowane przez

Abstract

Bilingualism imposes additional requirements on the cognitive system. As such, it can be a driving force of neuroplastic changes in the brain of a person who speaks more than one language. The need to store and use two systems of representations corresponding to the two languages as well as to develop an efficient control system which allows to use the intended, contextually appropriate language, may result in both functional and structural changes. Neuroimaging studies show that the neural organization of language representations in a bilingual brain depends to a large degree on the type of representation. Conceptual representations seem to share common neural underpinnings between the different languages. Lexical representations, related to the vocabulary and words, are processed by the same brain regions regardless of the language, however, they have been shown to be coded by distinct neuronal populations. Finally, neuroplastic reorganization of syntactic representations is highly dependent on factors related to individual experiences of bilingualism, such as age of acquisition and proficiency in the second language. Neuroplastic changes in the bilingual brain have also been linked to the increased demands that using two languages imposes on the cognitive control mechanisms. Both structural and functional changes in the brain of bilinguals were observed within a wide network referred to as language control network. Summing up, neuroimaging studies have demonstrated that bilingualism is related to neuroplastic changes in both structure and functioning of the brain. However, the newest reports suggest the extent and intensity of the neuroplastic changes are most likely dependent on individual experiences of each bilingual speaker.

Key words: bilingualism, neuroplasticity, language network, language control.

doświadczenie (Kossut 2019). W tradycyjnym ujęciu neuroplastyczność to przejście przez nowe obszary mózgu funkcji pierwotnie powiązanych z innymi strukturami, które uległy uszkodzeniu, np. w wyniku udaru (Fan i wsp. 2015) lub utraty

jednego ze zmysłów (Hirsch i wsp. 2015). Neuroplastyczne zmiany w mózgu zachodzą również u osób zdrowych, np. w wyniku intensywnego treningu związanego zarówno z nabywaniem nowych umiejętności (Siuda-Krzywicka i wsp. 2016), jak i trenowaniem wyższych funkcji poznawczych, takich jak pamięć przestrzenna (Maguire i wsp. 2000). W świetle badań pokazujących wrażliwość mózgu człowieka na doświadczenie rodzi się pytanie, czy również dwujęzyczność może być przyczyną funkcjonalnych i strukturalnych adaptacji neuronalnych. Czy można mówić o „dwujęzycznym mózgu”?

Dlaczego dwujęzyczność miałaby leżeć u podstaw neuroplastycznych zmian w mózgu? Znajomość i używanie więcej niż jednego języka w życiu codziennym wiąże się z dodatkowymi wyzwaniem poznawczymi (Green i Kroll 2019). Po pierwsze, system poznawczy osoby dwujęzycznej musi się zmierzyć ze zorganizowaniem dwóch odrębnych systemów reprezentacji językowych: pierwszego, ojczystego języka (L1) oraz drugiego języka (L2). Po drugie, osoba dwujęzyczna musi posiadać efektywny mechanizm kontrolujący aktywację obydwu systemów językowych pozwalający na użycie każdego z nich w odpowiednim kontekście. Ponieważ zarówno organizacja systemów reprezentacji dla dwóch języków, jak i kontrola poznawcza nakładają na system poznawczy dodatkowe wymagania, można się spodziewać, że będą podstawą szeregu neuroplastycznych zmian funkcjonalnych oraz strukturalnych.

Pytanie o konsekwencje dwujęzyczności dla funkcjonowania i struktury mózgu można rozbić na dwa bardziej szczegółowe zagadnienia. Po pierwsze – w jaki sposób są zorganizowane systemy reprezentacji obydwu języków? Po drugie – jakie jest neuronalne podłoże mechanizmów pozwalających osobom dwujęzycznym na sprawne posługiwanie się dwoma językami? Celem pracy jest podsumowanie badań przybliżających nas do odpowiedzi na powyższe pytania¹.

Jak dwujęzyczność wpływa na funkcjonowanie mózgu?

Lateralizacja języka u osób dwujęzycznych

Pierwsze badania wskazujące, że dwujęzyczność może się wiązać ze zmianą funkcjonowania mózgu, dotyczyły lateralizacji funkcji języko-

wych (np. Albert i Obler 1978). Według nich u osób, które rozpoczęły naukę drugiego języka przed 6. rokiem życia niezależnie od osiągniętego poziomu jego znajomości, obserwuje się większe niż u osób jednojęzycznych zaangażowanie obydwu półkul w procesy językowe (przegląd w: Hull i Vaid, 2006, 2007). Co ciekawe, większy stopień dominacji lewej półkuli w procesach językowych zaobserwowano również u osób dwujęzycznych, które posługują się językami pochodzącymi z różnych rodzin językowych, w porównaniu z osobami dwujęzycznymi, których języki są do siebie bardziej zbliżone (D'Anselmo i wsp. 2013).

W ciągu ostatnich 20 lat wraz z rozwojem technik neuroobrazowania znacząco poszerzyło się spektrum zagadnień podejmowanych w badaniach nad neuronalnym podłożem dwujęzyczności. Poniżej przedstawiono główne obszary aktualnych dociekań.

Organizacja systemów reprezentacji L1 i L2 w mózgu osoby dwujęzycznej

Procesy językowe ze względu na swoją złożoność angażują szereg różnych struktur w mózgu tworzących neuronalną sieć językową (Fedorenko i wsp. 2010). Sieć językowa zajmuje się kodowaniem oraz przetwarzaniem reprezentacji językowych, które można podzielić na: a) reprezentacje konceptualne, tworzące system pojęciowy, b) reprezentacje leksykalne, związane ze słownictwem, oraz c) reprezentacje syntaktyczne, kodujące zasady zestawiania ze sobą różnych typów słów w zdania.

Reprezentacje konceptualne w dwujęzycznym mózgu

Najważniejsze modele opisujące organizację języków w systemie poznawczym osób dwujęzycznych: odwrócony model hierarchiczny (Kroll i Stewart 1994), model interaktywnej aktywacji dwujęzycznej (*bilingual interactive activation* – BIA+; Dijkstra i van Heuven 2002) oraz model cech rozproszonych (van Hell i De Groot 1998), postulują istnienie wspólnego systemu pojęciowego dla obydwu języków. Badania neuroobrazowe dostarczają dane wspierające wnioski sformułowane na podstawie badań behawioralnych. W badaniach analizujących neuronalne podłoże przetwarzania słów o tym samym lub innym znaczeniu w pierwszym i drugim języku zaobserwowano wspólne podłoże neuronalne reprezentacji konceptualnych dla pierwszego i drugiego języka. Obszary zaangażowania obejmują m.in. przednią część lewego zakrętu

¹Mimo że omawiana w tekście tematyka budzi szczególnie zainteresowanie w kontekście rozwojowym, wykracza on poza zakres możliwy do omówienia w poniższym przeglądzie. Dlatego z żalem autorki pominięły coraz liczniejsze badania nad neuronalnymi korelatami dwujęzyczności u dzieci.

skroniowego (*anterior left temporal gyrus*; Crinion i wsp. 2006; Correia i wsp. 2014), obustronny zakręt przyhipokampowy (*parahippocampal gyrus*; Buchweitz i wsp. 2012) czy obustronną korę skroniowo-potyliczną (*temporo-occipital cortex*; Van de Putte i wsp. 2017; Correia i wsp. 2014). Podobne wyniki uzyskano w badaniach wykorzystujących zadania wymagające produkcji (Van de Putte i wsp. 2017), czytania (Buchweitz i wsp. 2012; Crinion i wsp. 2006), jak również słuchania (Correia i wsp. 2014) słów w obydwu językach. Co ciekawe, obszary mózgu aktywujące reprezentacje semantyczne wspólne dla obydwu języków są do pewnego stopnia zależne od wykonywanego zadania: w zadaniach wymagających produkcji wspólne podłoże neuronalne dla reprezentacji L1 i L2 zaobserwowano w korze skroniowej i potylicznej, natomiast w zadaniach wymagających rozumienia – słuchania i czytania – wspólne aktywacje dla L1 i L2 odnotowano w przedniej korze ciemieniowej (*anterior parietal cortex*), korze przedruchowej (*premotor cortex*) oraz zakręcie zaśrodkowym (*postcentral gyrus*). Obszarem zaangażowanym w przetwarzanie reprezentacji konceptualnych niezależnie od modalności jest lewy zakręt językowy (*left lingual gyrus*; Van de Putte i wsp. 2018).

Reprezentacje leksykalne w dwujęzycznym mózgu

Mózgowe podłoże systemów reprezentacji leksykalnych u osób dwujęzycznych ujęto w dwóch modelach teoretycznych: hipotezie zróżnicowanych reprezentacji (*differential representations hypothesis*; Paradis 2004) oraz hipotezie konwergencji (*convergence hypothesis*; Green 2003). Zgodnie z hipotezą zróżnicowanych reprezentacji reprezentacje leksykalne, związane ze znaczeniem oraz formą poszczególnych słów w danym języku, są przetwarzane przez odrębne sieci neuronów w ramach współdzielonych struktur odpowiedzialnych za przetwarzanie danego typu informacji. Jednak zawsze, niezależnie od biegłości w pierwszym i drugim języku, pozostają one odrębne dla każdego z języków (Roux i wsp. 2004; Paradis 2007). Zgodnie z alternatywną propozycją – hipotezą konwergencji (Green 2003), systemy reprezentacji każdego z języków osoby dwujęzycznej różnią się od siebie u osób o niskim poziomie biegłości w drugim języku, ale w miarę nabywania kompetencji w drugim języku jego reprezentacje stają się częścią ogólnego systemu językowego i jako takie nie różnią się jakościowo od reprezentacji ojczystego języka.

Obydwie teorie znajdują potwierdzenie w wynikach badań neuroobrazowych. Klein i wsp. (1995, 1999) pokazali, że generowanie słów w pierwszym i drugim języku angażuje tę samą sieć struktur w obrębie lewej dolnej, grzbietowo-bocznej kory czołowej (*left inferior/ventro-lateral frontal cortex*) oraz mózdzku (*cerebellum*). Zaobserwowane aktywacje nie różniły się od siebie ani w zakresie lokalizacji, ani intensywności. Z kolei w badaniu Chee i wsp. (1999) wykazano, że w obrębie sieci tych samych struktur aktywacje związane z generowaniem słów w drugim języku były słabsze w porównaniu z pierwszym językiem. Bardziej precyzyjnych informacji dotyczących organizacji reprezentacji językowych w mózgu osoby dwujęzycznej mogą dostarczyć badania wykorzystujące zjawisko adaptacji neuronalnej oraz analizę MVPA². Wykazały one, że przetwarzanie (czytanie) słów o tym samym znaczeniu w pierwszym i drugim języku angażuje tę samą sieć struktur obejmującą lewą boczną korę skroniową (*left lateral temporal cortex*), lewą grzbietową korę przedczołową (*left dorsal prefrontal cortex*), boczną korę potyliczną (*lateral parietal cortex*), zakręt wrzecionowaty (*fusiform gyrus*), górny i środkowy zakręt skroniowy, korę skroniowo-potyliczną i boczną korę przedczołową. W ramach tej sieci analiza MVPA pozwoliła jednak zidentyfikować odrębne aktywacje dla danego języka (Chee i wsp. 2003; Klein i wsp. 2006; Xu i wsp. 2017).

Reprezentacje syntaktyczne w dwujęzycznym mózgu

Według hipotezy konwergencji (Green 2003), podobnie jak reprezentacje leksykalne, systemy reprezentacji syntaktycznych każdego z języków różnią się od siebie tylko u osób o niskim poziomie biegłości w drugim języku. W miarę wzrostu poziomu znajomości drugiego języka jego reprezentacje stają się częścią ogólnego systemu językowego o wspólnym podłożu neuronalnym. Alternatywną propozycją do hipotezy konwergencji jest zaproponowany przez Ullmana (2001) model proceduralno-deklaratywny. Po-

²Adaptacja neuronalna to zjawisko polegające na spadku intensywności aktywacji neuronalnej w odpowiedzi na powtarzanie tych samych cech bodźca: jeżeli w odpowiedzi na powtórzenie tego samego słowa w innym języku zaobserwujemy spadek aktywności w danym obszarze mózgu, jest on odpowiedzialny za przetwarzanie cech wspólnych dla słów w pierwszym i w drugim języku. Analiza MVPA (*Multi-Voxel Pattern Analysis*) wykorzystuje metody maszynowego uczenia się i pozwala sprawdzić, czy na podstawie wzorca aktywacji dla jednego z języków można przewidywać aktywacje również w drugim języku.

stuluje on, że w przeciwieństwie do reprezentacji leksykalnych będących częścią pamięci deklaratywnej reprezentacje syntaktyczne ojczystego języka są przechowywane w pamięci proceduralnej. U osób dwujęzycznych, które rozpoczęły naukę drugiego języka po opanowaniu języka ojczystego, reprezentacje syntaktyczne drugiego języka są zwykle nabywane *explicite*, jako zestaw zasad, i jako takie są zapisywane w pamięci deklaratywnej (Ullman 2001). W związku z tym, zgodnie z założeniami modelu proceduralno-deklaratywnego, neuronalne podłoże reprezentacji obydwu języków jest różne, przy czym wielkość tej różnicy zależy w głównej mierze od wieku nabycia drugiego języka. Chociaż wraz ze wzrostem poziomu biegłości w zakresie drugiego języka jego reprezentacje syntaktyczne mogą zostać częściowo przejęte przez pamięć proceduralną, nigdy nie będą tworzyły jednolitego systemu z reprezentacjami syntaktycznymi języka ojczystego.

Z jednej strony niektóre badania wykorzystujące paradygmat oceny gramatyczności zdań (Luke i wsp. 2002) lub prymowania syntaktycznego (Weber i Indefrey 2009) wskazują, że reprezentacje syntaktyczne pierwszego i drugiego języka są przetwarzane przez tę samą sieć struktur obejmującą lewy środkowy zakręt skroniowy (*left middle temporal gyrus*) oraz lewy środkowy/dolny zakręt czołowy (*left mid/inferior frontal gyrus*). Z drugiej strony w zadaniu polegającym na wykrywaniu błędów syntaktycznych podczas słuchania lub czytania zdania w pierwszym i drugim języku zaobserwowano różnice w aktywacjach odpowiadających każdemu z języków: w pierwszym języku silniejsze aktywacje odnotowano w środkowej części lewego górnego zakrętu skroniowego (*mid left superior temporal gyrus*), natomiast drugi język w porównaniu z pierwszym wiązał się ze zwiększonymi aktywacjami m.in. w lewym dolnym zakręcie czołowym, obustronnym jądrze ogoniastym (*caudate nucleus*), lewej korze przedruchowej (*left pre-SMA*) i lewej brzuszno-bocznej korze przedczołowej (*left ventrolateral prefrontal cortex*; Rüschemeyer i wsp. 2005, 2006).

Próby wyjaśnienia rozbieżności w wynikach badań nad przetwarzaniem i organizacją reprezentacji syntaktycznych u osób dwujęzycznych odwoływały się do różnic w poziomie znajomości drugiego języka oraz wieku jego nabycia. Różnice w przetwarzaniu informacji syntaktycznych w zależności od poziomu znajomości drugiego języka zaobserwowano w obrębie lewego dolnego zakrętu czołowego oraz jąder podstawy (*basal ganglia*) – jądra ogoniastego i skorupy (*puta-*

men; Golestani i wsp. 2006), które w modelu proceduralno-deklaratywnym są łączone z przetwarzaniem informacji powiązanej z pamięcią proceduralną (Ullman 2001). Sugeruje to, że zgodnie z założeniami hipotezy konwergencji (Green 2003) wzrost biegłości w drugim języku wiąże się z plastyczną reorganizacją neuronalnego podłoża reprezentacji syntaktycznych obydwu języków.

W innych badaniach wykazano, że wzorce przetwarzania informacji syntaktycznej obserwowane w zadaniu wymagającym oceniania gramatyczności zdań zależą głównie od wieku nabycia drugiego języka, a nie od poziomu jego znajomości (Wartenburger i wsp. 2003). Podczas gdy w grupie osób, które miały kontakt z dwoma językami od dzieciństwa (tzw. wczesnych dwujęzycznych), nie zaobserwowano żadnych różnic pomiędzy wykonywaniem zadania w pierwszym i drugim języku, u osób, które rozpoczęły naukę języka po 6. roku życia (tzw. późnych dwujęzycznych), zaobserwowano zwiększone aktywacje związane z drugim językiem w całym systemie struktur korowych i podkorowych należących do sieci odpowiedzialnej za kontrolę językową, m.in. obustronnym dolnym zakręcie czołowym, jądrze ogoniastym i skorupie, środkowym zakręcie czołowym i lewym dolnym płaciku ciemieniowym (*left inferior parietal lobule*). Zwiększony wysiłek związany z kontrolą poznawczą można interpretować jako argument na rzecz słabszego zautomatyzowania procedur przetwarzania reprezentacji syntaktycznych drugiego języka.

Podsumowując – wyniki badań skupiających się na przetwarzaniu reprezentacji syntaktycznych nie dają jednoznacznej odpowiedzi na pytanie o sposób organizacji reprezentacji pierwszego i drugiego języka. Ponadto badania nad znaczeniem poziomu znajomości oraz wieku nabycia drugiego języka pokazują, że obydwa czynniki mogą (w różny sposób) wpływać na organizację reprezentacji syntaktycznych w dwujęzycznym mózgu.

Kontrola poznawcza

Obydwa systemy językowe osoby dwujęzycznej są aktywne przez cały czas, a reprezentacje jednego i drugiego języka nieustannie rywalizują ze sobą (Costa i wsp. 1999; Kroll i wsp. 2006), dlatego też osoba dwujęzyczna musi dysponować efektywnym mechanizmem kontrolującym aktywację obydwu systemów językowych pozwalającym na użycie każdego z nich w odpowiednim kontekście. W związku z tym różnice w funkcjonowaniu mózgu osób dwujęzycznych mogą wynikać również

ze wzmoczonego zaangażowania mechanizmów kontrolnych w procesy językowe. Na poziomie neuronalnym sieć kontroli językowej tworzą przede wszystkim: grzbietowa część przedniego zakrętu obręczy (*dorsal anterior cingulate cortex* – dACC), dodatkowa kora przedruchowa (*supplementary motor area*), lewa kora przedczołowa (*left prefrontal cortex*) oraz prawy i lewy płacik ciemieniowy dolny. Zgodnie z modelem mózgowej sieci zaangażowanej w kontrolę językową zaproponowanym przez Abutalebiego i Greena (2016) struktury te realizują wiele istotnych zadań pozwalających osobie dwujęzycznej na sprawne posługiwanie się obydwoma językami. Grzbietowa część zakrętu obręczy oraz dodatkowa kora przedruchowa (które wg modelu Abutalebiego i Greena są traktowane jako jeden funkcjonalny kompleks – *dACC/pre-SMA*) są zaangażowane w monitorowanie konfliktu i korygowanie potencjalnych błędów powstających na różnych etapach przetwarzania językowego. Aktywacje w grzbietowym zakręcie obręczy oraz dodatkowej korze przedruchowej wiążą się z przełączaniem się pomiędzy językami (*language-switching*; Abutalebi i wsp. 2007, 2008; Garbin i wsp. 2011; Rodriguez-Fornells i wsp. 2005), ale także z przełączaniem się pomiędzy rzeczownikami a czasownikami u osób dwujęzycznych (Abutalebi i wsp. 2013a) czy w zadaniach niejęzycznych wymagających monitorowania konfliktu i kontroli odpowiedzi (przegląd badań dot. funkcji przedniego zakrętu obręczy: Botvinick i wsp. 2001). Kolejnymi strukturami odgrywającymi kluczową rolę w sieci kontroli językowej są lewy i prawy dolny zakręt czołowy. Lewy dolny zakręt czołowy jest zaangażowany w selekcję odpowiedzi oraz przewyższanie automatycznych odpowiedzi (Abutalebi i Green 2016). Silniejsze aktywacje w lewym dolnym zakręcie czołowym towarzyszą produkcji mowy w słabszym, drugim języku (De Bleser i wsp. 2003; Kovelman i wsp. 2007; Parker Jones i wsp. 2012; Perani i wsp. 2003), co Abutalebi i Green (2016) tłumaczą dodatkowym wysiłkiem poznawczym związanym z wyszukiwaniem i wydobywaniem reprezentacji leksykalnych słabszego języka. W przeciwieństwie do silnie wyspecjalizowanego w selekcji informacji językowej lewego dolnego zakrętu czołowego, prawy zakręt czołowy jest zaangażowany w ogólną kontrolę poznawczą i hamowanie (Aron i wsp. 2014). Do sieci zaangażowanej w kontrolę językową należą również prawy i lewy płacik ciemieniowy dolny, które są odpowiedzialne za reorientowanie zasobów uwagi zarówno kierowanej odgórnie (Majerus i wsp. 2009; Shomstein 2012), jak i oddolnie

(Shomstein 2012). Poza strukturami korowymi w kontrolę językową zaangażowane są także wzgórze (*thalamus*), jądra podstawy, w szczególności skorupa oraz mózdzek (Abutalebi i Green 2007, 2016; Green i Abutalebi 2013). Wzgórze, mające liczne połączenia z przednią i tylną częścią lewego dolnego zakrętu czołowego (Ford i wsp. 2013), jest zaangażowane w selekcję właściwych reprezentacji leksykalnych i semantycznych w produkcji języka u osób dwujęzycznych (Abutalebi i Green 2016). Aktywność lewego jądra ogoniastego jest obserwowana w sytuacji wymagającej przełączania pomiędzy językami i wiązana z koniecznością wyboru właściwego języka zarówno w produkcji (Abutalebi i wsp. 2013a), jak i rozumieniu (Abutalebi i wsp. 2007; Crinion i wsp. 2006). Aktywacje w lewym jądrze ogoniastym są również wrażliwe na poziom znajomości języka – struktura ta jest silniej aktywowana przy przełączaniu się na język o niższym poziomie znajomości (Abutalebi i wsp. 2013a). Sugeruje to, że lewe jądro ogoniaste odgrywa kluczową rolę w monitorowaniu i kontroli aktualnie używanego języka (Crinion i wsp. 2006). W skład sieci kontroli językowej wchodzi także skorupa, której aktywność jest wrażliwa na wymagania artykulacyjne związane z produkcją mowy w drugim języku (Burgaleta i wsp. 2016; Golestani i wsp. 2006). Ostatnią ze struktur wchodzącą w skład sieci kontroli językowej opisaną przez Abutalebiego i Greena (2016) jest mózdzek, który jest zaangażowany m.in. w przetwarzanie informacji morfosyntaktycznej w drugim języku (Pliatsikas i wsp. 2014) oraz kontrolę interferencji pomiędzy językami (Filippi i wsp. 2011).

Coraz więcej doniesień wskazuje na różnice w aktywacjach mózgowych u osób jedno- i dwujęzycznych zarówno w zadaniach wymagających użycia języka, jak i w zadaniach niejęzycznych (Abutalebi i wsp. 2012; Ansaldo i wsp. 2015; Costumero i wsp. 2015). U osób dwujęzycznych w porównaniu z osobami jednojęzycznymi podczas wykonywania zadania w pierwszym języku zaobserwowano silniejsze aktywacje w lewej dolnej korze czołowej (Rodriguez-Fornells i wsp. 2005), dodatkowej korze przedruchowej i przedniej części zakrętu obręczy (*pre-SMA/ACC*) oraz lewej korze ciemieniowej: zakręcie nadbrzeżnym i kątowym (*angular and supramarginal gyrus*; Rossi i wsp. 2018). Różnice między osobami jedno- i dwujęzycznymi dotyczą zatem zaangażowania struktur leżących u podstaw sieci kontroli językowej.

Według najnowszych badań wpływu dwujęzyczności na funkcjonowanie kontroli poznawczej

nie można traktować zero-jedynkowo (DeLuca i wsp. 2020; Sulpizio i wsp. 2020). Zarówno różnice w funkcjonowaniu mózgu, jak i zmiany strukturalne są wynikiem nie tyle samego zaklasyfikowania danej osoby jako dwujęzycznej, ile wypadkową szeregu doświadczeń związanych z dwujęzycznością. Zmiany funkcjonalne i strukturalne w mózgu osoby dwujęzycznej są związane z długością trwania doświadczenia dwujęzyczności (mierzonego za pomocą wieku nabycia drugiego języka oraz immersji w środowisku drugiego języka) oraz intensywnością tego doświadczenia (mierzoną jako użycie pierwszego i drugiego języka w różnych kontekstach formalnych i nieformalnych). Z tej perspektywy to nie sam fakt bycia osobą dwujęzyczną, ale raczej całość doświadczenia dwujęzyczności są przyczyną neuroplastycznych zmian w mózgu, które składają się zarówno na funkcjonowanie językowe, jak i ogólną kontrolę poznawczą (DeLuca i wsp. 2020; Sulpizio i wsp. 2020).

Jak dwujęzyczność wpływa na strukturę mózgu?

Reorganizacja systemu reprezentacji leksykalnych wynikająca z uczenia się i używania drugiego języka wiąże się z szeregiem zmian strukturalnych. Objętość istoty szarej w obrębie płata skroniowego jest związana z poziomem znajomości drugiego języka (Mårtensson i wsp. 2012; Stein i wsp. 2012) oraz z zasobem słownictwa w drugim języku (Grogan i wsp. 2009). Z poziomem znajomości drugiego języka wiąże się również objętość istoty szarej w lewej dolnej korze ciemieniowej (Abutalebi i wsp. 2015; Della Rosa i wsp. 2013; Mechelli i wsp. 2004). Objętość tej struktury jest również negatywnie skorelowana z wiekiem nabycia drugiego języka (Mechelli i wsp. 2004). W odróżnieniu od lewej dolnej kory ciemieniowej prawa dolna kora ciemieniowa podlega zmianom ze względu na intensywność kontaktu z drugim językiem (Abutalebi i wsp. 2015). Dwujęzyczność wiąże się również ze zmianami strukturalnymi w przedniej części lewego dolnego zakrętu czołowego. Objętość istoty szarej w tej strukturze wzrasta wraz z zasobem słownictwa w drugim języku oraz jest negatywnie skorelowana z wiekiem nabycia drugiego języka (Grogan i wsp. 2012). Większa objętość w zakresie lewego dolnego zakrętu czołowego wiąże się również z poziomem znajomości drugiego języka oraz intensywnym treningiem językowym (Mårtensson i wsp. 2012; Stein i wsp. 2012). Zmiany strukturalne łączące się ze wzrostem poziomu znajomości drugiego

języka zaobserwowano również w hipokampie (Mårtensson i wsp. 2012).

Zmiany strukturalne w dwujęzycznym mózgu mogą się wiązać również ze wzmożonym zaangażowaniem kontroli językowej w procesy językowe. U osób dwujęzycznych obserwuje się zwiększoną objętość struktur odpowiedzialnych za szereg procesów związanych z kontrolą poznawczą i językową (Li i wsp. 2014). Zmiany strukturalne odnotowano m.in. w obrębie skorupy – struktury związanej z kontrolą procesów artykulacyjnych (Abutalebi i wsp. 2013), oraz w obrębie lewego jądra ogoniastego zaangażowanego w monitorowanie i kontrolę aktualnie używanego języka (DeLuca i wsp. 2020; Grogan i wsp. 2009; Zou i wsp. 2012). Zmiany strukturalne związane z dwujęzycznością zaobserwowano także w płaciku ciemieniowym dolnym (Della Rosa i wsp. 2013; Grogan i wsp. 2012; Mechelli i wsp. 2004) oraz lewym dolnym zakręcie czołowym (Grogan i wsp. 2012; Mårtensson i wsp. 2012; Stein i wsp. 2012) – strukturach odpowiedzialnych za alokację zasobów uwagi oraz selekcję właściwej odpowiedzi. Chociaż zmiany w obrębie lewego płacika ciemieniowego dolnego oraz lewego dolnego zakrętu czołowego łączone są też z organizacją reprezentacji w dwujęzycznym mózgu (w szczególności z zasobem słownictwa), stanowią one również część sieci zaangażowanej w kontrolę językową. Może to świadczyć o przeplataniu się sieci kontroli językowej oraz reprezentacji w obrębie tych samych struktur.

Podsumowanie

Celem pracy był przegląd najważniejszych doniesień na temat wpływu dwujęzyczności na strukturę i funkcjonowanie mózgu. Coraz liczniejsze badania neuroobrazowe wskazują, że doświadczenie dwujęzyczności prowadzi do rozległych, neuroplastycznych zmian wynikających ze zwiększonych wymagań, jakie dwujęzyczność nakłada na system poznawczy. W związku z rosnącą liczbą badań skupiających się na funkcjonowaniu i strukturze dwujęzycznego mózgu przedstawiony przegląd nie wyczerpuje zagadnienia. Na podstawie dostępnych badań można jednak stwierdzić, że doświadczenie dwujęzyczności ma wpływ zarówno na funkcjonowanie i organizację mózgowego systemu językowego, jak i na ogólne funkcjonowanie poznawcze: bardziej efektywne wykorzystywanie mechanizmów kontroli poznawczej oraz funkcji wykonawczych. Doświadczenie dwujęzyczności prowadzi do neuroplastycznych zmian w całej sieci struktur obejmujących korę mózgową

oraz struktury podkorowe. Najnowsze badania starają się odpowiedzieć na pytanie, w jaki sposób poszczególne aspekty doświadczenia dwujęzyczności (m.in. wiek rozpoczęcia nauki, biegłość czy intensywność i kontekst użycia języków) przekładają się na neuroplastyczne zmiany w dwujęzycznym mózgu.

Źródła finansowania

Praca nad tekstem była możliwa dzięki finansowaniu z grantu OPUS 2017/27/B/HS6/00959 przyznanemu dr hab. Zofii Wodnieckiej przez Narodowe Centrum Nauki.

Oświadczenie

Autorki deklarują brak konfliktu interesów.

Piśmiennictwo

1. Abutalebi J, Annoni JM, Zimine I i wsp. Language control and lexical competition in bilinguals: an event-related fMRI study. *Cereb Cortex* 2008; 18: 1496-1505.
2. Abutalebi J, Brambati SM, Annoni JM i wsp. The neural cost of the auditory perception of language switches: an event-related functional magnetic resonance imaging study in bilinguals. *J Neurosci* 2007; 27: 13762-13769.
3. Abutalebi J, Canini M, Della Rosa PA i wsp. The neuroprotective effects of bilingualism upon the inferior parietal lobule: a structural neuroimaging study in aging Chinese bilinguals. *J Neurolinguistics* 2015; 33: 3-13.
4. Abutalebi J, Della Rosa PA, Green DW i wsp. Bilingualism tunes the anterior cingulate cortex for conflict monitoring. *Cereb Cortex* 2012; 22: 2076-2086.
5. Abutalebi J, Green D. Bilingual language production: The neurocognition of language representation and control. *J Neurolinguistics* 2007; 20: 242-275.
6. Abutalebi J, Green DW. Neuroimaging of language control in bilinguals: neural adaptation and reserve. *Biling Lang Cogn* 2016; 19: 689-698.
7. Abutalebi J, Rosa PAD, Castro Gonzaga AK. The role of the left putamen in multilingual language production. *Brain Lang* 2013; 125: 307-315.
8. Albert, M, Obler LK. The bilingual brain: Neuropsychological and neurolinguistic aspects of bilingualism. Academic Press, New York 1978.
9. Ansaldo AI, Ghazi-Saidi L, Adrover-Roig D. Interference control in elderly bilinguals: appearances can be misleading. *J Clin Exp Neuropsychol* 2015; 37: 455-470.
10. Aron AR, Robbins TW, Poldrack RA. Inhibition and the right inferior frontal cortex: one decade on. *Trends Cogn Sci* 2014; 18: 177-185.
11. Botvinick MM, Braver TS, Barch DM i wsp. Conflict monitoring and cognitive control. *Psychol Rev* 2001; 108: 624-652.
12. Buchweitz A, Shinkareva SV, Mason RA i wsp. Identifying bilingual semantic neural representations across languages. *Brain Lang* 2012; 120: 282-289.
13. Burgaleta M, Sanjuán A, Ventura-Campos N i wsp. Bilingualism at the core of the brain. Structural differences between bilinguals and monolinguals revealed by subcortical shape analysis. *NeuroImage* 2016; 125: 437-445.
14. Chee MWL, Soon CS, Lee HL. Common and segregated neuronal networks for different languages revealed using functional magnetic resonance adaptation. *J Cogn Neurosci* 2003; 15: 85-97.
15. Chee MWL, Tan EWL, Thiel T. Mandarin and English single word processing studied with functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci* 1999; 19: 3050-3056.
16. Correia J, Formisano E, Valente G i wsp. Brain-based translation: fMRI decoding of spoken words in bilinguals reveals language-independent semantic representations in anterior temporal lobe. *J Neurosci* 2014; 34: 332-338.
17. Costa A, Miozzo M, Caramazza A. Lexical selection in bilinguals: Do words in the bilingual's two lexicons compete for selection? *J Mem Lang* 1999; 41: 365-397.
18. Costumero V, Rodríguez-Pujadas A, Fuentes-Claramonte P i wsp. How bilingualism shapes the functional architecture of the brain: A study on executive control in early bilinguals and monolinguals. *Hum Brain Mapp* 2015; 36: 5101-5112.
19. Crinion J, Turner R, Grogan A i wsp. Language control in the bilingual brain. *Science* 2006; 312: 1537-1540.
20. D'Anselmo A, Reiterer S, Zuccarini F i wsp. Hemispheric asymmetries in bilinguals: Tongue similarity affects lateralization of second language. *Neuropsychologia* 2013; 51: 1187-1194.
21. De Bleser R, Dupont P, Postler J i wsp. The organisation of the bilingual lexicon: a PET study. *J Neurolinguistics* 2003; 16: 439-456.
22. Della Rosa PA, Videsott G, Borsa VM i wsp. A neural interactive location for multilingual talent. *Cortex* 2013; 49: 605-608.
23. DeLuca V, Rothman J, Bialystok E i wsp. Duration and extent of bilingual experience modulate neurocognitive outcomes. *NeuroImage* 2020; 204: 116222.
24. Dijkstra T, Van Heuven WJ. The architecture of the bilingual word recognition system: from identification to decision. *Biling: Lang Cogn* 2002; 5: 175-197.
25. Fan Y, Wu C, Liu H i wsp. Neuroplastic changes in resting-state functional connectivity after stroke rehabilitation. *Front Hum Neurosci* 2015; 9: 546.
26. Filippi R, Richardson FM, Dick F i wsp. The right posterior paravermis and the control of language interference. *J Neurosci* 2011; 31: 10732-10740.
27. Fedorenko E, Hsieh PJ, Nieto-Castañón A. New method for fMRI investigations of language: defining ROIs functionally in individual subjects. *J Neurophysiol* 2010; 104: 1177-1194.
28. Ford A, Triplett W, Sudhyadhom A i wsp. Broca's area and its striatal and thalamic connections: a diffusion-MRI tractography study. *Front Neuroanat* 2013; 7: 8.
29. Garbin G, Costa A, Sanjuan A i wsp. Neural bases of language switching in high and early proficient bilinguals. *Brain Lang* 2011; 119: 129-135.
30. Golestani N, Alario FX, Meriaux S i wsp. Syntax production in bilinguals. *Neuropsychologia* 2006; 44: 1029-1040.
31. Green DW. Neural basis of lexicon and grammar in L2 acquisition: The convergence hypothesis. W: van Hout R, Hulk A, Kuiken F, Towell R (red.). *The interface between syntax and the lexicon in second language acquisition*. London 2003; 197-208.
32. Green DW, Abutalebi J. Language control in bilinguals: The adaptive control hypothesis. *J Cogn Psychol* 2013; 25: 515-530.
33. Green DW, Kroll JF. *The neurolinguistics of bilingualism*. W: de Zubicaray GI, Schiller NO (red.). *The Oxford Handbook of Neurolinguistics*. Oxford University Press 2019; 261-294.

34. Grogan A, Green DW, Ali N i wsp. Structural correlates of semantic and phonemic fluency ability in first and second languages. *Cereb Cortex* 2009; 19: 2690-2698.
35. Grogan A, Parker Jones O, Ali N i wsp. Structural correlates for lexical efficiency and number of languages in non-native speakers of English. *Neuropsychologia* 2012; 50: 1347-1352.
36. Hirsch GV, Bauer CM, Merabet LB. Using structural and functional brain imaging to uncover how the brain adapts to blindness. *Ann Neurosci Psychol* 2015; 2: 5.
37. Hull R, Vaid J. Bilingual language lateralization: A meta-analytic tale of two hemispheres. *Neuropsychologia* 2007; 45: 1987-2008.
38. Hull R, Vaid J. Laterality and language experience. *Laterality* 2006; 11: 436-464.
39. Klein D, Milner B, Zatorre RJ i wsp. The neural substrates underlying word generation: a bilingual functional-imaging study. *Proc Natl Acad Sci* 1995; 92: 2899-2903.
40. Klein D, Milner B, Zatorre RJ i wsp. Cerebral organization in bilinguals: A PET study of Chinese-English verb generation. *NeuroReport* 1999; 10: 2841-2845.
41. Klein D, Zatorre RJ, Chen JK i wsp. Bilingual brain organization: A functional magnetic resonance adaptation study. *NeuroImage* 2006; 31: 366-375.
42. Kossut M. Basic mechanism of neuroplasticity. *Neuropsychiatr Neuropsychol* 2009; 14: 1-8.
43. Kovelman I, Baker SA, Petitto LA. Bilingual and monolingual brains compared: a functional magnetic resonance imaging investigation of syntactic processing and a possible "neural signature" of bilingualism. *J Cogn Neurosci* 2007; 20: 153-169.
44. Kroll JF, Bobb SC, Wodniecka Z. Language selectivity is the exception, not the rule: arguments against a fixed locus of language selection in bilingual speech. *Biling: Lang Cogn* 2006; 9: 119-135.
45. Kroll JF, Stewart E. Category interference in translation and picture naming: evidence for asymmetric connections between bilingual memory representations. *J Mem Lang* 1994; 33: 149-174.
46. Li P, Legault J, Litcofsky KA. Neuroplasticity as a function of second language learning: Anatomical changes in the human brain. *Cortex* 2014; 58: 301-324.
47. Luke KK, Liu HL, Wai YY i wsp. Functional anatomy of syntactic and semantic processing in language comprehension. *Hum Brain Mapp* 2002; 16: 133-145.
48. Maguire EA, Gadian DG, Johnsrude IS i wsp. Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. *Proc Natl Acad Sci* 2000; 97: 4398-4403.
49. Majerus S, D'Argembeau A, Martinez Perez T i wsp. The commonality of neural networks for verbal and visual short-term memory. *J Cogn Neurosci* 2009; 22: 2570-2593.
50. Mårtensson J, Eriksson J, Bodammer NC i wsp. Growth of language-related brain areas after foreign language learning. *NeuroImage* 2012; 63: 240-244.
51. Mechelli A, Crinion JT, Noppeney U i wsp. Structural plasticity in the bilingual brain. *Nature* 2004; 431: 757-757.
52. Paradis M. A neurolinguistic theory of bilingualism. John Benjamins Publishing 2004.
53. Paradis M. The neurofunctional components of the bilingual cognitive system. W: Kecskes I, Albertazzi L (red.). *Cognitive aspects of bilingualism*. Dordrecht 2007; 3-28.
54. Park HRP, Badzakova-Trajkov G, Waldie KE. Language lateralisation in late proficient bilinguals: A lexical decision fMRI study. *Neuropsychologia* 2012; 50: 688-695.
55. Parker Jones O, Green DW, Grogan A i wsp. Where, when and why brain activation differs for bilinguals and monolinguals during picture naming and reading aloud. *Cereb Cortex* 2012; 22: 892-902.
56. Perani D, Abutalebi J, Paulesu E i wsp. The role of age of acquisition and language usage in early, high-proficient bilinguals: An fMRI study during verbal fluency. *Hum Brain Mapp* 2003; 19: 170-182.
57. Pliatsikas C, Johnstone T, Marinis T. Grey matter volume in the cerebellum is related to the processing of grammatical rules in a second language: a structural voxel-based morphometry study. *Cerebellum* 2014; 13: 55-63.
58. Rodriguez-Fornells A, van der Lugt A, Rotte M i wsp. Second language interferes with word production in fluent bilinguals: brain potential and functional imaging evidence. *J Cogn Neurosci* 2005; 17: 422-433.
59. Rossi E, Newman S, Kroll JF i wsp. Neural signatures of inhibitory control in bilingual spoken production. *Cortex* 2018; 108: 50-66.
60. Roux FE, Lubrano V, Lauwers-Cances V i wsp. Intra-operative mapping of cortical areas involved in reading in mono- and bilingual patients. *Brain* 2004; 127: 1796-1810.
61. Rüschemeyer SA, Fiebach CJ, Kempe V i wsp. Processing lexical semantic and syntactic information in first and second language: fMRI evidence from German and Russian. *Hum Brain Mapp* 2005; 2: 266-286.
62. Rüschemeyer SA, Zysset S, Friederici AD. Native and non-native reading of sentences: An fMRI experiment. *NeuroImage* 2006; 31: 354-365.
63. Shomstein S. Cognitive functions of the posterior parietal cortex: top-down and bottom-up attentional control. *Front Integr Neurosci* 2012; 6: 38.
64. Siuda-Krzywicka K, Bola Ł, Paplińska M i wsp. Massive cortical reorganization in sighted Braille readers. *eLife* 2016; 5: e10762.
65. Stein M, Federspiel A, Koenig T i wsp. Structural plasticity in the language system related to increased second language proficiency. *Cortex* 2012; 48: 458-465.
66. Sulpizio S, Del Maschio N, Del Mauro G i wsp. Bilingualism as a gradient measure modulates functional connectivity of language and control networks. *NeuroImage* 2020; 205: 116306.
67. Ullman MT. The declarative/procedural model of lexicon and grammar. *J Psycholinguist Res* 2001; 30: 37-69.
68. Van de Putte E, De Baene W, Brass M i wsp. Neural overlap of L1 and L2 semantic representations in speech: a decoding approach. *NeuroImage* 2017; 162: 106-116.
69. Van de Putte E, De Baene W, Price CJ i wsp. Neural overlap of L1 and L2 semantic representations across visual and auditory modalities: a decoding approach. *Neuropsychologia* 2018; 113: 68-77.
70. Van Hell JG, De Groot AM. Conceptual representation in bilingual memory: Effects of concreteness and cognate status in word association. *Biling: Lang Cogn* 1998; 1: 193-211.
71. Wartenburger I, Heekeren HR, Abutalebi J i wsp. Early setting of grammatical processing in the bilingual brain. *Neuron* 2003; 37: 159-170.
72. Weber K, Indefrey P. Syntactic priming in German-English bilinguals during sentence comprehension. *NeuroImage* 2009; 46: 1164-1172.
73. Xu M, Baldauf D, Chang CQ i wsp. Distinct distributed patterns of neural activity are associated with two languages in the bilingual brain. *Sci Adv* 2017; 3: e1603309.
74. Zou L, Ding G, Abutalebi J i wsp. Structural plasticity of the left caudate in bimodal bilinguals. *Cortex* 2012; 48: 1197-1206.