Now Audiofonol, 2025; 14(4): 57–73
DOI: 10.17431/na/214262
CC BY-NC-ND 3.0 PL, © Autorzy

Nowa Audiofonologia®
Praktyka kliniczna

Przesłano do redakcji: 15.05.2025
Zaakceptowano po recenzji: 14.11.2025
Opublikowano: 08.01.2026

# Czy jeden język wystarczy? Rola dwujęzycznego mapowania fMRI w przedoperacyjnej ocenie funkcji językowych – rozszerzone studium przypadków

# Is one language enough? The role of bilingual fMRI mapping in preoperative language function assessment: an extended case study

**Joanna Beck*[1A-F], Agnieszka Pluta*[1A-F], Tomasz Furtak[2B], Tomasz Wolak[1F-G]**

* Autorzy wnieśli równy wkład

[1] Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, Światowe Centrum Słuchu, Naukowe Centrum Obrazowania Biomedycznego, Warszawa/Kajetany

[2] Uniwersytet Warszawski, Wydział Psychologii, Warszawa

Wkład autorów:
A Projekt badania
B Gromadzenie danych
C Analiza danych
D Interpretacja danych
E Przygotowanie pracy
F Przegląd literatury
G Gromadzenie funduszy

**Streszczenie**

**Wprowadzenie:** Funkcjonalne obrazowanie mózgu z wykorzystaniem fMRI odgrywa główną rolę w przedoperacyjnym mapowaniu funkcji językowych u pacjentów, u których zmiany patologiczne zlokalizowane są w tzw. obszarach elokwentnych. W kontekście rosnącej liczby osób posługujących się na co dzień więcej niż jednym językiem, szczególnego znaczenia nabiera pytanie, czy mapowanie wyłącznie w języku pierwszym (L1) wystarcza, by ograniczyć ryzyko zaburzenia funkcji mowy. Choć klasyczne modele języka zakładają spójną reprezentację różnych języków w mózgu, dane neuroobrazowe wskazują, że nabycie języka drugiego (L2) w późniejszym wieku może prowadzić do jego odrębnej reprezentacji funkcjonalnej.
**Materiał i metody:** W badaniu wzięło udział sześć zdrowych osób dwujęzycznych (polsko-angielskich, polsko-rosyjskich, rosyjsko-angielskich). Uczestnicy wykonali dwa zadania z zakresu fluencji słownej (generowanie czasowników i kończenie zdań) w skanerze MRI, osobno w L1 i L2. Dane fMRI analizowano z wykorzystaniem standardowych metod, m.in. modelu liniowego i funkcji odpowiedzi hemodynamicznej.
**Wyniki:** Zarówno w przypadku L1, jak i L2 odnotowano aktywację w klasycznych regionach językowych, jednak wzorce aktywności dla L2 były bardziej rozproszone i indywidualnie zróżnicowane. W L2 obserwowano silniejsze zaangażowanie lewego dolnego zakrętu czołowego oraz przedczołowych i przyhipokampowych struktur, szczególnie podczas zadania kończenia zdań. Zadania wykonywane w L1 ukazywały bardziej spójną i lewostronną aktywność mózgu.
**Wnioski:** Wyniki wskazują, że mapowanie tylko jednego języka może być niewystarczające u osób dwujęzycznych. L2 może angażować dodatkowe obszary, których nieuwzględnienie w planowaniu chirurgicznym może prowadzić do selektywnych deficytów językowych po operacji. Ze względu na niewielką liczebność grupy wyniki należy traktować jako pilotażowe, lecz pozostają one spójne z wcześniejszymi doniesieniami. Dane wspierają kliniczną użyteczność dwujęzycznego mapowania fMRI i uzasadniają jego wdrażanie jako standardowej procedury przedoperacyjnej u pacjentów dwujęzycznych.
**Słowa kluczowe:** fMRI • język • dwujęzyczność

**Abstract**

**Introduction:** Functional brain imaging using fMRI plays a crucial role in preoperative mapping of language functions in patients with pathological changes located in so-called eloquent brain areas. In the context of a growing number of individuals who use more than one language in their daily lives, the question arises whether mapping only the native language (L1) is sufficient to effectively

**Autor korespondencyjny:** Agnieszka Pluta, Naukowe Centrum Obrazowania Biomedycznego, Światowe Centrum Słuchu, Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, ul. Mokra 17, Kajetany, 05-830 Nadarzyn; email: a.pluta@ifps.org.pl

preserve language functions. While classical models of language assume a unified representation of different languages in the brain, neuroimaging data indicate that acquisition of a second language (L2) later in life may lead to its distinct functional representation, including greater involvement of prefrontal and parahippocampal regions.
**Material and methods:** Six bilingual individuals (Polish-English, Polish-Russian, and Russian-English speakers) participated in the study. Participants completed two fMRI tasks (verb generation and sentence completion), separately in L1 and L2. FMRI data were analyzed using standard methods, applying a general linear model and a typical hemodynamic response function.
**Results:** Activation was observed in classical language regions for both L1 and L2; however, activation patterns for L2 were more diffuse and varied across individuals. L2 elicited stronger engagement of the left inferior frontal gyrus, as well as prefrontal and parahippocampal structures, particularly during the sentence completion task. In contrast, L1 showed more consistent and left-lateralized activation patterns.
**Conclusions:** These findings suggest that mapping only one language may be insufficient in bilingual individuals. L2 may involve additional brain regions, which—if not accounted for in surgical planning – could increase the risk of selective postoperative language deficits. Due to the small sample size, the results should be considered as preliminary; however, they remain consistent with previous findings.
**Keywords:** fMRI • language • bilingualism

| Skrót | Rozwinięcie skrótu | Odpowiednik w języku polskim |
|---|---|---|
| AF | arcuate fasciculus | pęczek łukowaty |
| AoA | age of acquisition | wiek nabycia języka |
| BOLD | blood oxygen level-dependent | sygnał zależny od poziomu natlenienia krwi (sygnał BOLD) |
| fMRI | functional magnetic resonance imaging | funkcjonalne obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego |
| GLM | general linear model | ogólny model liniowy |
| HRF | hemodynamic response function | funkcja odpowiedzi hemodynamicznej |
| IFG | inferior frontal gyrus | zakręt czołowy dolny |
| L1 | first language | pierwszy język (ojczysty/ rodzimy) |
| L2 | second language | drugi język (język obcy/ nabywany) |
| MNI (standard space) | (standard brain space defined by) Montreal Neurological Institute | standardowa przestrzeń anatomiczna mózgu, zdefiniowana przez Montreal Neurological Institute |
| SMA | supplementary motor area | dodatkowe pole ruchowe |
| VWFA | visual word form area | obszar wzrokowej formy słów |
| WMA | World Medical Association | Światowe Stowarzyszenie Lekarskie |

## Wprowadzenie

Operacje neurochirurgiczne wykonywane w obrębie tzw. elokwentnych obszarów mózgu wiążą się z wysokim ryzykiem powikłań w postaci deficytów neurologicznych, których konsekwencje mogą istotnie wpływać na późniejszą kondycję psychofizyczną pacjentów. Wiąże się to z faktem, że obszary elokwentne obejmują te struktury mózgu, których uszkodzenie może poważnie zaburzyć podstawowe funkcje motoryczne oraz językowe, znacznie upośledzając codzienne funkcjonowanie chorych. Zachowanie wysokiej sprawności poznawczej jest sprawą niezwykle istotną i warunkuje nie tylko wysoką jakość życia, lecz często także wydłużenie życia, co sprawia, że ochrona tych struktur stanowi priorytet w planowaniu zabiegów neurochirurgicznych [1].

W tym kontekście technika funkcjonalnego rezonansu magnetycznego (ang. *functional magnetic resonance imaging*, fMRI) oparta na sygnale BOLD (ang. *blood oxygen level-dependent*) jest nieocenionym narzędziem umożliwiającym precyzyjną lokalizację obszarów zaangażowanych w zasadnicze procesy poznawcze i czuciowo-ruchowe – w tym mowę, ruch, wzrok czy czucie – w sposób całkowicie nieinwazyjny. Coraz szersze zastosowanie tej metody w ocenie ryzyka operacyjnego oraz do ustalania optymalnego zakresu resekcji (pozwalającego na zachowanie funkcjonalności pacjenta przy jednoczesnym osiągnięciu odpowiedniej resekcji zmiany chorobowej) pozwala znacząco zmniejszyć prawdopodobieństwo wystąpienia poważnych deficytów neuropsychologicznych po zabiegu [2].

Jednym z najczęściej mapowanych w tym celu obszarów są te zaangażowane w funkcje językowe. Należy jednak podkreślić, że ich lokalizacja w mózgu stanowi znaczne wyzwanie badawcze, przede wszystkim z uwagi na wieloaspektowy charakter języka. Język tworzy bowiem złożony konstrukt integrujący liczne, wzajemnie na siebie oddziałujące systemy, takie jak leksykalno-semantyczny,

gramatyczny czy fonologiczny [3,4]. W związku z tym funkcje językowe są reprezentowane w rozległych obszarach kory mózgowej, rozciągających się na bocznych powierzchniach płatów czołowych i skroniowych.

W ujęciu klasycznym zakładano istnienie uproszczonego modelu neuronalnego, w którym podstawową rolę odgrywają: ośrodek Broki (zlokalizowany w dolnym zakręcie czołowym, pole Brodmana 44 i 45) – odpowiedzialny za produkcję mowy; ośrodek Wernickego (zlokalizowany w tylnej części zakrętu skroniowego górnego płata skroniowego, pole Brodmanna 22) – odpowiadający za rozumienie mowy; oraz pęczek łukowaty (ang. *arcuate fasciculus*, AF) łączący oba te obszary [5]. Pierwotnym argumentem wspierającym tę koncepcję były pozorne dysocjacje funkcji językowych obserwowane u pacjentów z zaburzeniami mowy. Jednakże szczegółowa analiza wskazuje, że deficyty te dotyczą raczej procesów percepcji i artykulacji mowy niższego rzędu, a nie wyższych mechanizmów rozumienia czy produkcji języka. Wraz z intensywnym rozwojem technik neuroobrazowania uzyskano pełniejszy obraz neuronalnych korelatów języka, który pokazuje, że 1) w przetwarzanie językowe zaangażowanych jest znacznie więcej obszarów mózgu niż zakładano w tradycyjnych modelach oraz że 2) procesy rozumienia i produkcji zdań w dużej mierze zachodzą dzięki jednoczesnej aktywacji struktur zlokalizowanych w płatach czołowych i skroniowych [6–8].

U większości osób obszary językowe wykazują lateralizację z wyraźną dominacją lewej półkuli, choć w analogicznych rejonach prawej półkuli również obserwuje się aktywność mózgową, jednak zazwyczaj wyraźnie słabszą. Co więcej, topografia systemu językowego wykazuje względną wewnątrzosobniczą stabilność w czasie i pozostaje podobna nawet w przypadku języków należących do różnych rodzin. Jednocześnie liczne badania wskazują, że doświadczenia językowe – takie jak deprywacja czy dwujęzyczność – mogą istotnie modyfikować mózgowe korelaty języka zarówno na poziomie struktury, jak i funkcji [9–11].

Biorąc pod uwagę, że co najmniej 40–50% światowej populacji posługuje się na co dzień więcej niż jednym językiem – a niektóre źródła szacują ten odsetek nawet na 60–75% [12,13] – przedoperacyjne mapowanie języków, którymi posługuje się pacjent, staje się szczególnie istotne podczas planowania zabiegów neurochirurgicznych w obszarach elokwentnych dla mowy. W takich przypadkach bardzo istotne jest uwzględnienie wszystkich języków używanych przez pacjenta na co dzień, zwłaszcza gdy posługuje się on dwoma lub więcej językami.

Dwujęzyczność oznacza regularne używanie dwóch języków przez tę samą osobę z co najmniej funkcjonalnym poziomem biegłości w każdym z nich. Poziom tej biegłości i zakres użycia języka mogą się przy tym znacznie różnić między osobami, co sprawia, że dwujęzyczność ujmuje się zwykle jako kontinuum (np. od wczesnej i równoczesnej – kiedy oba języki nabywane są w dzieciństwie, po późniejszą i sukcesywną – gdy drugi język przyswajany jest na dalszym etapie rozwoju) [14–16].

Klasyczne badania neuropsychologiczne wskazały, że neuronalne reprezentacje różnych języków u osób dwujęzycznych mogą się od siebie funkcjonalnie różnić, na co dowodem były przypadki dwujęzycznych pacjentów z afazją, którzy selektywnie tracili tylko jeden język [17]. Współczesne badania z wykorzystaniem technik neuroobrazowania mózgu tylko częściowo potwierdzają wcześniejsze doniesienia [11,18,19]. Po pierwsze wykazano, że osoby dwujęzyczne z wczesną ekspozycją na dwa języki używają zasadniczo tych samych obszarów mózgu do przetwarzania obu języków, co zaobserwowano klasycznie u osób jednojęzycznych (por. metaanaliza [19]). Natomiast późna ekspozycja na drugi język może prowadzić do innego profilu neuronalnego, charakteryzującego się większym zaangażowaniem obszarów czołowych (obustronnie) dla później nabytego języka (L2) [20–24].

Wyniki licznych badań wskazują, że podczas produkcji mowy w L2 – w porównaniu z L1 – aktywowana jest rozbudowana, obustronna sieć struktur mózgowych, obejmująca m.in. korę przedczołową, przednią część zakrętu obręczy, dodatkowe pole ruchowe, lewy i prawy dolny płat ciemieniowy, móżdżek, wzgórze oraz jądra podstawy. Abutalebi i Green [25] zaproponowali, że obszary te tworzą tzw. sieć kontroli językowej u osób dwujęzycznych (ang. *bilingual language control*). Zwiększona aktywność tej sieci może wskazywać na większe zapotrzebowanie na kontrolę wykonawczą, wspierającą adekwatny dobór słów z mentalnego słownika L1 lub L2 zależnie od kontekstu. Tym samym wzmożona aktywność mózgu podczas używania L2 może nie tylko wynikać z przetwarzania językowego, lecz także z większego zapotrzebowania na zasoby poznawcze związane z kontrolą uwagi i hamowaniem konkurencyjnych reprezentacji językowych.

Zarówno wiek nabycia języka (ang. *age of acquisition*, AoA), jak i stopień ekspozycji językowej wpływają na wzorce aktywacji mózgu podczas zadania produkcji językowej, nawet w przypadku osób z tzw. wczesną dwujęzycznością i porównywalnym poziomem biegłości w obu językach [26,27]. Wiek 6–7 lat jest powszechnie uznawany za granicę między wczesną a późną dwujęzycznością [26]. Jest to związane z ważnymi zmianami rozwojowymi, które zachodzą w tym okresie, kiedy mózg osiąga niemal dorosłe rozmiary, większość procesów mielinizacji dobiega końca, a podstawowe umiejętności językowe są już w dużej mierze rozwinięte [28–30]. Potwierdzeniem tego faktu są m.in wyniki Perani i wsp. [26], którzy wykazali, że zadanie fluencji słownej prowadzi do mniej rozległej aktywacji sieci językowej w obrębie zakrętu czołowego dolnego lewej półkuli mózgu podczas generowania słów w L1 w porównaniu do L2. Warto zaznaczyć, że uczestnicy badania nabyli L2 bardzo wcześnie – przed ukończeniem trzeciego roku życia – co może tłumaczyć relatywnie niewielkie różnice między językami.

Podobne wnioski wynikają z metaanaliz badań nad wpływem wieku nabycia L2 na mechanizmy mózgowe przetwarzania zarówno L1, jak i L2. Osoby, które opanowały L2 w późniejszym wieku, wykazywały silniejszą aktywację dodatkowych obszarów mózgu, także tych wykraczających poza klasyczne regiony językowe, podczas posługiwania się drugim językiem – w porównaniu do osób, które nabyły L2 we wczesnym dzieciństwie. Różnice te były szczególnie widoczne w regionach takich jak wyspa (obustronnie) czy lewy zakręt czołowy dolny, czyli

w obszarach zaangażowanych m.in. w kontrolę wykonawczą. Wyniki te sugerują, że przetwarzanie L2 nabytego późno wiąże się z większym obciążeniem poznawczym w porównaniu do wczesnej dwujęzyczności [31,32].

Wyniki szerokiego przeglądu metaanaliz przedstawione przez Comstock [33] dodatkowo podkreślają, że mimo dużej liczby badań neuroobrazowych nad przetwarzaniem L1 i L2, wyniki poszczególnych eksperymentów często pozostają niespójne. Metaanalizy pozwalają zwiększyć moc statystyczną i ujawnić subtelne różnice w sieciach neuronalnych obsługujących pierwszy i drugi język, które mogą być niewidoczne w pojedynczych badaniach. Jednocześnie różnice w projektach badawczych, takie jak: definicje poziomu biegłości, wiek nabycia języka czy zróżnicowanie zadań, znacząco wpływają na rozbieżność wyników, co utrudnia stworzenie spójnego modelu mechanizmów mózgowych dwujęzyczności [33].

Podsumowując, współczesne rozumienie mózgowych korelatów dwujęzyczności zakłada, że mechanizmy przetwarzania języka są w dużej mierze wspólne dla obu języków. Główna różnica między osobami posługującymi się tylko jednym językiem a osobami dwujęzycznymi (zarówno z wczesną, jak i późną dwujęzycznością) dotyczy raczej zwiększonego zaangażowania systemów kontroli wykonawczej, umożliwiających zarządzanie dwoma systemami językowymi, niż samego przetwarzania językowego. Jednocześnie, większa biegłość w L2 skutkuje mniejszą aktywnością neuronalną (która staje się bardziej wyspecjalizowana i ograniczona do sieci językowej) oraz mniejszymi różnicami w zakresie mózgowej reprezentacji L1 oraz L2 [34].

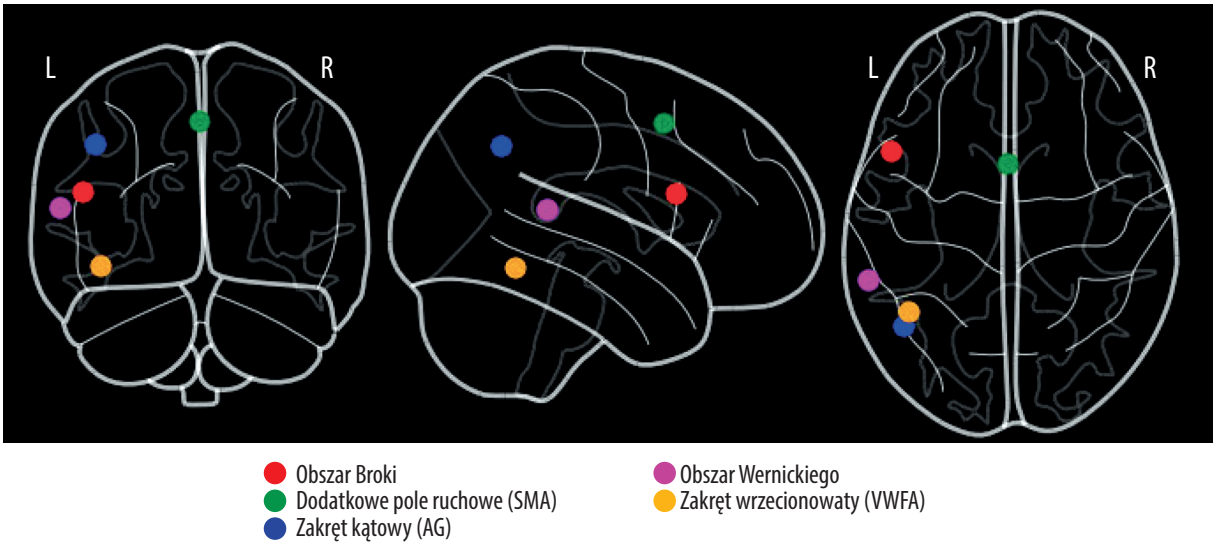
Co więcej, wyniki niektórych badań wskazują na istnienie różnic zależnych od rozważanego poziomu przetwarzania języka. Przetwarzanie leksykalno-semantyczne w L1 angażuje bardziej rozległy system obszarów korowo-podkorowych w porównaniu do L2, szczególnie gdy L2 jest nabywany w późniejszym etapie życia [19]. Może to sugerować, że w przypadku L1 przetwarzanie słów wspomagane jest przez dostęp do bogatszego systemu leksykalno-semantycznego opartego na bardziej rozległej sieci mózgowej. Tymczasem różnice między L1 a L2 w zakresie gramatyki i fonologii okazały się stosunkowo niewielkie.

Kolejnym istotnym zagadnieniem jest lateralizacja funkcji językowych u osób dwujęzycznych [35]. Jak wykazali Wolna i wsp. [34], produkcja mowy w L2 w porównaniu z L1 silniej angażuje lewą półkulę, a w szczególności zakręt czołowy dolny (ang. *inferior frontal gyrus*, IFG). Zaobserwowano również, że im dłuższy był czas potrzebny na nazwanie bodźca w L2, tym wyższa była aktywność w tej strukturze. Biorąc pod uwagę heterogeniczność funkcjonalną IFG (obejmującą zarówno procesy językowe, takie jak: kodowanie fonetyczne, sylabizację i planowanie artykulacji, jak i ogólnopoznawcze, np. selekcję spośród konkurujących reprezentacji), autorzy postulują, że wyższa aktywność w lewym IFG podczas mowy w L2 w porównaniu z L1 odzwierciedla większy stopień trudności w zakresie kodowania fonologicznego oraz przetwarzania artykulacyjnego dla L2. Dodatkowo, silniejsze zaangażowanie prawej półkuli w produkcję języka L1 niż języka L2 może być związane z wyższym stopniem automatyzacji L1 w porównaniu z L2, zwłaszcza u osób dwujęzycznych, które nauczyły się L2 w późniejszym okresie życia. Wynik ten wskazuje, że silniejsza lateralizacja L2 niekoniecznie odzwierciedla lateralizację samych procesów językowych, lecz raczej lateralizację ogólnych mechanizmów kontrolnych wspierających produkcję mowy w L2 [34].

W kontekście mózgowych korelatów dwujęzyczności badacze eksplorowali również wpływ przejrzystości ortograficznej (ang. *orthographic transparency*), czyli stopnia zgodności między formą graficzną (grafemem) a fonologiczną (fonemem) języka. Takie języki jak włoski czy fiński charakteryzują się wysoką przejrzystością ortograficzną – zasady konwersji grafem–fonem są w nich regularne. Języki polski i rosyjski znajdują się niemal pośrodku tego kontinuum [36]. Natomiast takie języki jak angielski czy francuski cechuje ortografia nieprzezroczysta, w której te relacje są mniej przewidywalne [37]. W przypadku osób dwujęzycznych uczących się języków o różnym stopniu przezroczystości, obserwuje się odmienne wzorce aktywacji mózgowej. Badanie Dong i wsp. [38] wykazało, że im mniejszy dystans w zakresie przezroczystości ortograficznej między L1 a L2, tym większe podobieństwo wzorców aktywacji neuronalnej. U użytkowników języka ujgurskiego (o bardzo przejrzystej ortografii) przetwarzanie angielskiego – języka mniej przejrzystego ortograficznie niż ujgurski, ale bardziej przejrzystego niż logograficzny chiński – wiązało się z większym podobieństwem map aktywacji mózgowej podczas czytania prostych wyrazów (np. *girl*). Zbieżność ta obejmowała głównie obszary zaangażowane w przetwarzanie fonologiczne, takie jak m.in. zakręt kątowy czy zakręt nadbrzeżny. Wyniki te sugerują, że podobieństwo ortograficzne między językami sprzyja wykorzystywaniu tych samych sieci neuronalnych, co może ułatwiać przetwarzanie L2 poprzez aktywację wzorców przyswojonych dla L1 [38,39].

Podsumowując, przegląd piśmiennictwa wykazał, że: 1) pierwszy i drugi język są przetwarzane zasadniczo przez tą samą sieć językową; 2) różnice w mózgowej reprezentacji L1 oraz L2 zależą od: biegłości językowej, wieku nabycia L2, przejrzystości ortograficznej oraz badanego podsystemu językowego; 3) L2 dodatkowo angażuje obszary zaangażowane w kontrolę wykonawczą (por. metaanaliza Sulpizio i wsp [19]).

Pomimo znacznego zainteresowania mechanizmami mózgowymi dwujęzyczności, ocena neuronalnych mechanizmów odpowiedzialnych za L1 i L2 nadal nie stanowi rutynowej praktyki w procedurach przedoperacyjnego mapowania. Tymczasem z punktu widzenia planowania operacji neurochirurgicznych w obszarach elokwentnych dla funkcji mowy potencjalne różnice w reprezentacji mózgowej poszczególnych języków mogą prowadzić do zwiększonego ryzyka uszkodzenia każdego z nich, jeśli wszystkie powiązane z nimi obszary nie zostaną dokładnie zmapowane przed operacją. Tymczasem wobec wzrostu liczby osób dwujęzycznych w Polsce (związanym m.in. sytuacją gospodarczą i aktualną sytuacją geopolityczną, co pociąga za sobą większą migrację) uwzględnienie zarówno L1, jak i L2 w procesie planowania zabiegów neurochirurgicznych wydaje się odgrywać zasadniczą rolę w minimalizowaniu ryzyka wystąpienia zaburzeń językowych w każdym z używanych przez pacjenta języków.




Opis: 1) obszar Broki znajduje się w tylnej części zakrętu czołowego dolnego i odpowiada za produkcję mowy oraz składnię; 2) dodatkowe pole ruchowe (SMA) położone jest w przyśrodkowej części zakrętu czołowego górnego, uczestniczy w inicjowaniu i sekwencjonowaniu ruchów mowy; 3) zakręt kątowy leży w dolnym płacie ciemieniowym i bierze udział w przekształcaniu języka pisanego na mowę oraz w przetwarzaniu semantycznym; 4) obszar Wernickego obejmuje tylną część zakrętu skroniowego górnego oraz zakręt nadbrzeżny, odpowiada za rozumienie języka i przetwarzanie fonologiczne; 5) obszar wzrokowej formy słów w zakręcie wrzecionowatym (VWFA), odpowiada za automatyczne rozpoznawanie znanych słów lub liter w postaci wzrokowej.

**Rycina 1.** Obszary mózgu mapowane w badaniach klinicznych
**Figure 1.** Regions of the brain mapped in clinical studies

W praktyce klinicznej nadal główny nacisk kładzie się na mapowanie klasycznego modelu Wernickego–Lichtheima–Geschwinda (obszar Broki, obszar Wernickego oraz pęczek łukowaty). Badania Benjamina i wsp. [43] wykazały, że w rutynowych warunkach klinicznych możliwe jest mapowanie bardziej rozbudowanego systemu językowego obejmującego sześć podstawowych obszarów językowych: 1) obszar Broki (BA45/46), 2) pole Exnera (BA6) zlokalizowane w tylnej części zakrętu czołowego środkowego, 3) obszar Wernickego (BA22), 4) dodatkowe pole ruchowe (ang. *supplementary motor area*, SMA), 5) zakręt kątowy (ang. *angular gyrus*), 6) podstawny obszar językowy płata skroniowego (ang. *basal temporal language area*, BTLA). W niniejszej pracy, aby zachować klarowność prezentacji wyników i ich omówienia, skupiono się na wybranych głównych obszarach mapowania przedoperacyjnego oraz na obszarze wzrokowej formy słów (ang. *visual word form area*, VWFA) w zakręcie wrzecionowatym lewej półkuli mózgu, który odgrywa istotną rolę w procesie czytania. VWFA (**rycina 1**).

Celem niniejszego badania jest ocena klinicznej skuteczności mapowania obszarów językowych w obu językach u osób dwujęzycznych, z wykorzystaniem zadań eksperymentalnych rutynowo wykorzystywanych podczas tego typu procedur dla L1, czyli ciche generowanie czasowników oraz kończenie zdań (opisane w sekcji: metody). W niniejszym artykule zaprezentowano mapy aktywacji mózgu zdrowych osób posługujących się na co dzień dwoma językami: polskim i rosyjskim (języki strukturalnie i leksykalnie zbliżone (języki słowiańskie), lecz zapisane różnym alfabetem (łaciński vs cyrylica), polskim i angielskim (języki strukturalnie i leksykalnie różne, zapisane tym samym alfabetem) oraz angielskim i rosyjskim (języki strukturalnie i leksykalnie różne oraz zapisane różnym alfabetem).

## Materiał i metody

### Osoby badane

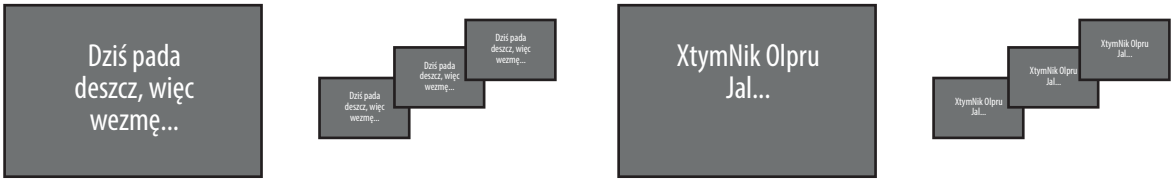
W badaniu wzięło udział sześć osób dwujęzycznych (3 kobiety, 3 mężczyzn) w wieku od 19 do 42 lat (średni wiek: 28 lat). Wszyscy uczestnicy byli zdrowi i nie zgłaszali żadnej historii chorób neurologicznych ani psychiatrycznych. Uczestnicy różnili się wiekiem rozpoczęcia nauki L2, a także kontekstem jego używania, lecz wszyscy zostali zakwalifikowani jako osoby dwujęzyczne na podstawie współczesnych definicji, które podkreślają bieżące, aktywne i funkcjonalne posługiwanie się dwoma językami niezależnie od tego, czy L2 został opanowany we wczesnym dzieciństwie, czy na późniejszym etapie rozwoju. W przypadku czterech osób językiem pierwszym (L1) był język polski, a posługiwały się one także językami angielskim (OB1, OB2) lub rosyjskim (OB3, OB4) jako L2; w przypadku dwóch osób L1 był język rosyjski, a L2 – język angielski (OB5, OB6). Trzy osoby (OB2, OB3, OB5) nabyły L2 we wczesnym dzieciństwie (od urodzenia lub do 3. roku życia), natomiast pozostali uczestnicy rozpoczęli naukę L2 później – w wieku od 2 do 14 lat. Wszyscy uczestnicy deklarowali regularne używanie L2 w środowisku rodzinnym i/lub w pracy. Liczba lat edukacji formalnej wynosiła od 13,5 do 22 lat (średnia: ok. 16,7 lat). Charakterystyka uczestników została przedstawiona w **tabeli 1**.

**Tabela 1.** Charakterystyka osób badanych
**Table 1.** Characteristics of the study participants

| Kod | Płeć | Wiek | Lata edukacji | Język L1 | Język L2 | Ile miał lat, kiedy zaczął się uczyć | Gdzie używa L2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OB1 | mężczyzna | 26 | 18 | polski | angielski | 2 | środowisko rodzinne/ praca |
| OB2 | kobieta | 20 | 16 | polski | angielski | od urodzenia | środowisko rodzinne/ praca |
| OB3 | kobieta | 19 | 13,5 | polski | rosyjski | od urodzenia | środowisko rodzinne |
| OB4 | mężczyzna | 42 | 22 | polski | rosyjski | 3 | środowisko rodzinne/ praca |
| OB5 | mężczyzna | 34 | 16 | rosyjski | angielski | 14 | środowisko rodzinne/ praca |
| OB6 | kobieta | 27 | 15 | rosyjski | angielski | 6 | środowisko rodzinne/ praca |




**Rycina 2.** Schemat zadania „Fluencja słowna – czasowniki"
**Figure 2.** Diagram of the task "Verbal Fluency – Verbs"




**Rycina 3.** Schemat zadania „Kończenie zdań"
**Figure 3.** Diagram of the task "Sentence Completion"

### Procedura badawcza

Badania były przeprowadzane w Naukowym Centrum Obrazowania Biomedycznego w Światowym Centrum Słuchu w Kajetanach z wykorzystaniem skanera MR Magnetom Prisma 3T. Badanie trwało ok. 60 minut i składało się z następujących części:

1. Przedstawienie celu i przebiegu badania, uzyskanie świadomej zgody.
2. Uzupełnienie ankiety kwalifikacyjnej do badania MRI przez uczestników.
3. Sesja treningowa przed rozpoczęciem badania w skanerze rezonansu magnetycznego.
4. Badanie właściwe w skanerze rezonansu magnetycznego.

Badanie zostało przeprowadzone zgodnie z zasadami opracowanymi przez World Medical Association (WMA) i zawartymi w Deklaracji helsińskiej, regulującej etyczne standardy prowadzenia badań z udziałem ludzi. Wszyscy uczestnicy zostali poinformowani o celu badania, jego przebiegu, potencjalnych korzyściach i ryzyku, a także o możliwości rezygnacji z udziału na każdym etapie bez podania przyczyny i bez żadnych negatywnych konsekwencji. Po uzyskaniu pełnej informacji uczestnicy wyrazili świadomą zgodę na udział w badaniu.

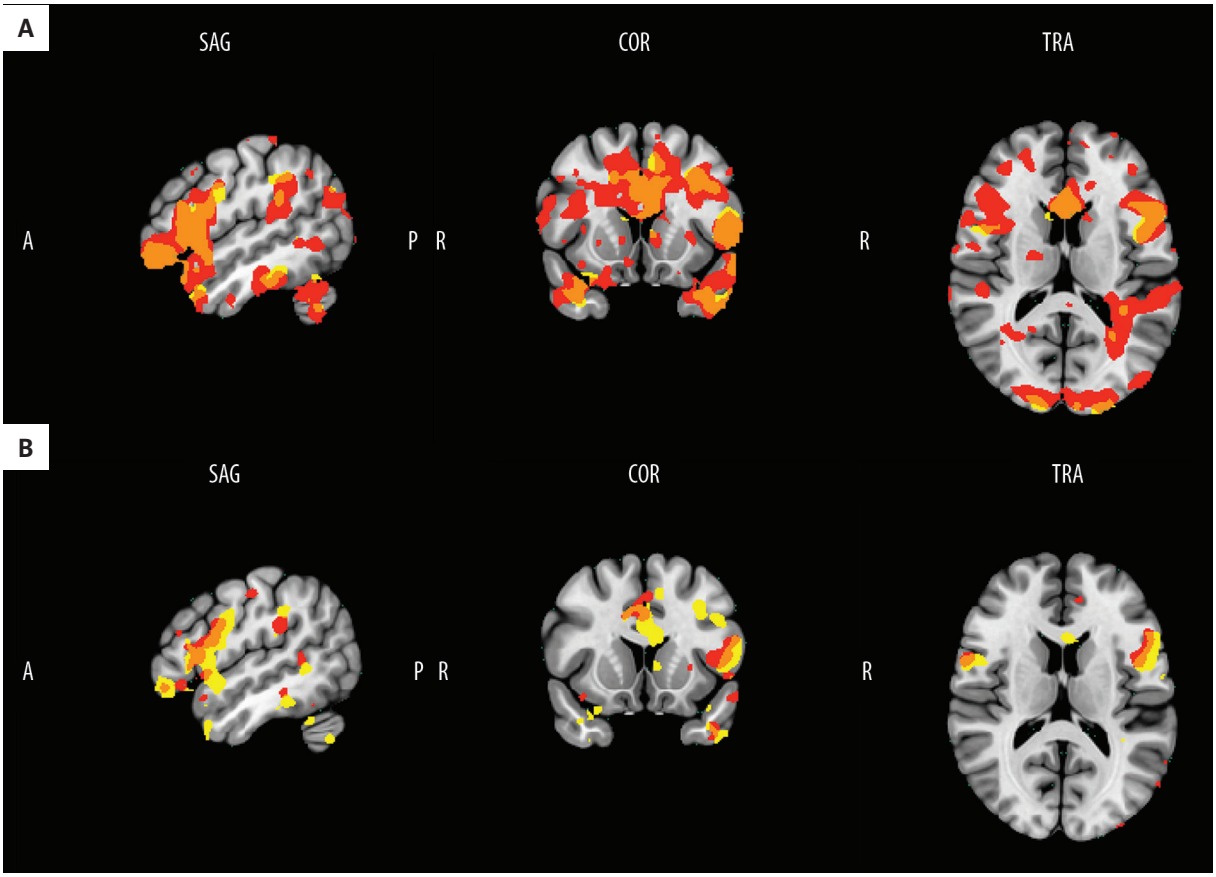
### Sesja treningowa

Sesja treningowa obejmowała prezentację zadań, które uczestnicy wykonywali później w skanerze; każde zadanie było przedstawiane przez około 30 sekund na ekranie komputera. Uczestnicy zostali poinformowani o całym przebiegu badania i mieli możliwość zadawania pytań po każdej części instruktażowej.

### Badanie właściwe – fMRI

#### *Opis zadań wykonywanych w skanerze MRI*

Badani wykonywali te same zadania dwukrotnie: najpierw w języku L1, później w języku L2. Kolejność zadań była losowa.




**Rycina 4. A**) Aktywacja mózgowa OB1 w odpowiedzi na zadanie dot. generowania czasowników w myślach; kolor czerwony prezentuje aktywacje dla L1 (język polski), żółty – aktywację dla L2 (angielski, uczony od 2 roku życia, używany w środowisku rodzinnym i pracy), pomarańczowy oznacza pokrywające się obszary dla L1 i L2. **B**) Aktywacja mózgowa OB1 w odpowiedzi na zadanie dot. generowania w myślach zakończenia przeczytanych zdań; kolor czerwony prezentuje aktywację dla L1 (język polski), żółty – aktywację dla L2 (angielski, uczony od 2 roku życia, używany w środowisku rodzinnym i pracy), pomarańczowy oznacza pokrywające się obszary dla L1 i L2
**Figure 4. A**) Brain activation in participant OB1 in response to the verb-generation task performed mentally; red indicates activation for L1 (Polish), yellow indicates activation for L2 (English, learned from age 2 and used in the family and work environment), and orange indicates overlapping areas for L1 and L2. **B**) Brain activation in participant OB1 in response to the sentence-completion task performed mentally; red indicates activation for L1 (Polish), yellow indicates activation for L2 (English, learned from age 2 and used in the family and work environment), and orange indicates overlapping areas for L1 and L2

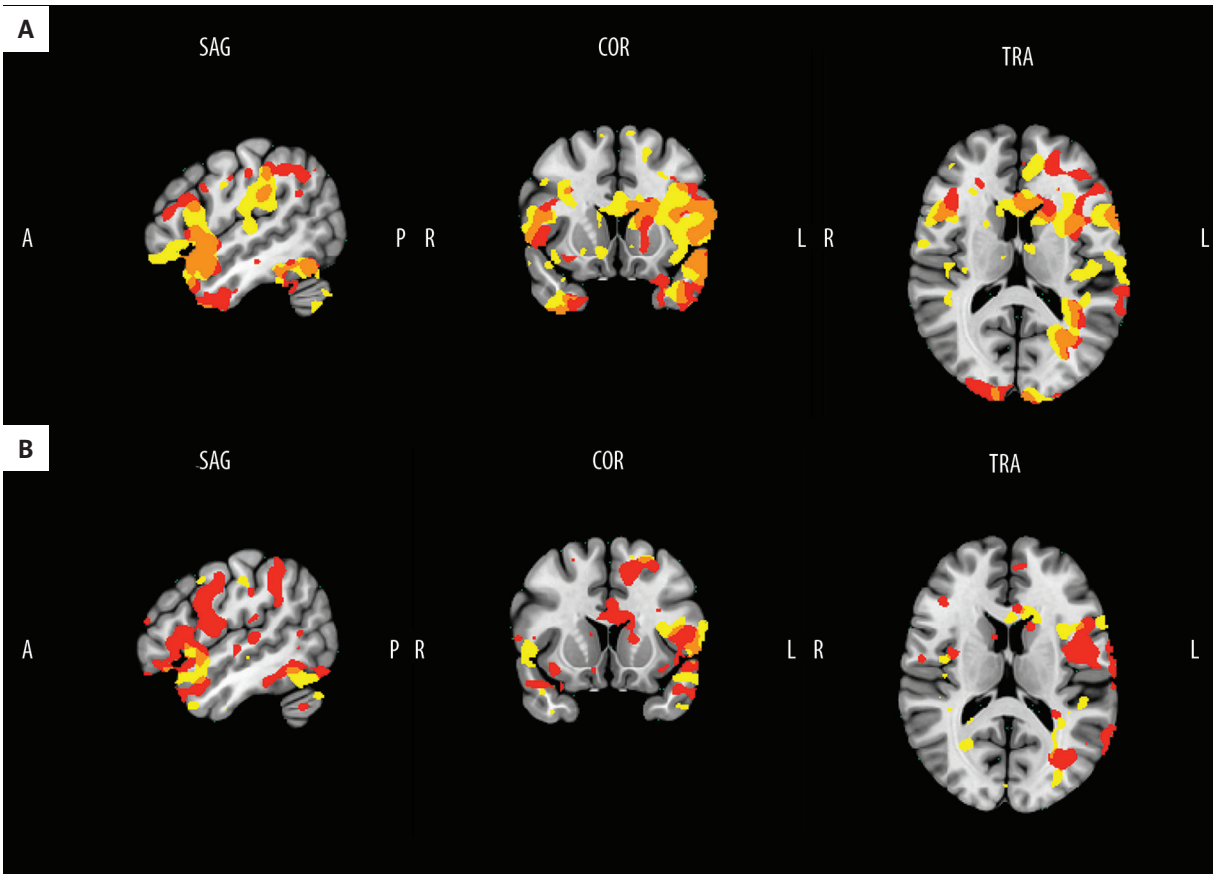
„Zadanie fluencja słowna – czasowniki" polegało na tym, że osoba badana słyszała w słuchawkach w skanerze słowo (np. lalka, łóżko) i była proszona o generowanie w myślach jak największej liczby czasowników pasujących do usłyszanego słowa (np. bawić się, spać itd.). Badanie zostało przeprowadzone w schemacie blokowym. Każdy blok zadaniowy trwał 30 s, podczas których co 6 s prezentowano rzeczowniki (5 słów w bloku). W zadaniu kontrolnym przez 30 s prezentowano punkt fiksacji (podczas którego osoby badane proszone były o niegenerowanie mowy wewnętrznej). Graficzne przedstawienie zadania znajduje się na **rycinie 2**.

Zadanie „Kończenie zdań" składało się z bloków zadaniowych, podczas których osoba badana była proszona o dokończenie w myśli zdania, np. „Dziś pada deszcz, więc wezmę…". W bloku zadaniowym prezentowano cztery zdania. Blok kontrolny zawierał ciągi liter np. „XtymNik Olpru JaI…". Osoby badane były proszone o czytanie ciągu liter. Bloki zadaniowe i kontrolne trwały po 20 sekund. Graficzne przedstawienie zadania znajduje się na **rycinie 3**.

Procedura bezgłośnego generowania słów jest często stosowana w badaniach mózgowych mechanizmów mowy, ponieważ pozwala na ograniczenie artefaktów związanych z ruchami żuchwy podczas wypowiadania słów [2]. W przypadku zadania „Fluencja słowna – czasowniki" wszystkie bodźce prezentowane były słuchowo obuusznie. Do stymulacji użyto słuchawek elektrodynamicznych kompatybilnych z MRI. Do prezentacji bodźców wzrokowych użyto ekranu LCD z systemem luster umieszczonych na cewce odbiorczej, co umożliwiało osobom badanym oglądanie wyświetlanych słów lub punktu fiksacji.

### *Parametry akwizycji obrazów MRI*

Parametry poszczególnych sekwencji były następujące: „Fluencja słowna – czasowniki": SingleShot EPI w płaszczyźnie *axial* (ang. *axial plane*) o rozdzielczości anizotropowej 2 × 2 × 2,4 mm, TR = 1500 ms, TE = 27 ms, *flip angle* = 90, FOV = 192 × 192 mm, matrix 64 × 64, 37 warstw, grubość warstwy: 2,4 mm, liczba wolumentów = 240, czas akwizycji TA = 6 min.




**Rycina 5. A**) Aktywacja mózgowa OB2 w odpowiedzi na zadanie dot. generowania czasowników w myślach; kolor czerwony prezentuje aktywacje dla L1 (język polski), żółty – aktywację dla L2 (angielski, uczony od urodzenia, używany w środowisku rodzinnym i pracy), pomarańczowy oznacza pokrywające się obszary dla L1 i L2. **B**) Aktywacja mózgowa OB2 w odpowiedzi na zadanie dot. generowania w myślach zakończenia przeczytanych zdań; kolor czerwony prezentuje aktywację dla L1 (język polski), żółty – aktywację dla L2 (angielski, uczony od urodzenia, używany w środowisku rodzinnym i pracy), pomarańczowy oznacza pokrywające się obszary dla L1 i L2
**Figure 5. A**) Brain activation in participant OB2 in response to the verb-generation task performed mentally; red indicates activation for L1 (Polish), yellow indicates activation for L2 (English, learned from birth and used in the family and work environment), and orange indicates overlapping areas for L1 and L2. **B**) Brain activation in participant OB2 in response to the task of mentally completing read sentences; red indicates activation for L1 (Polish), yellow indicates activation for L2 (English, learned from birth and used in the family and work environment), and orange indicates overlapping areas for L1 and L2

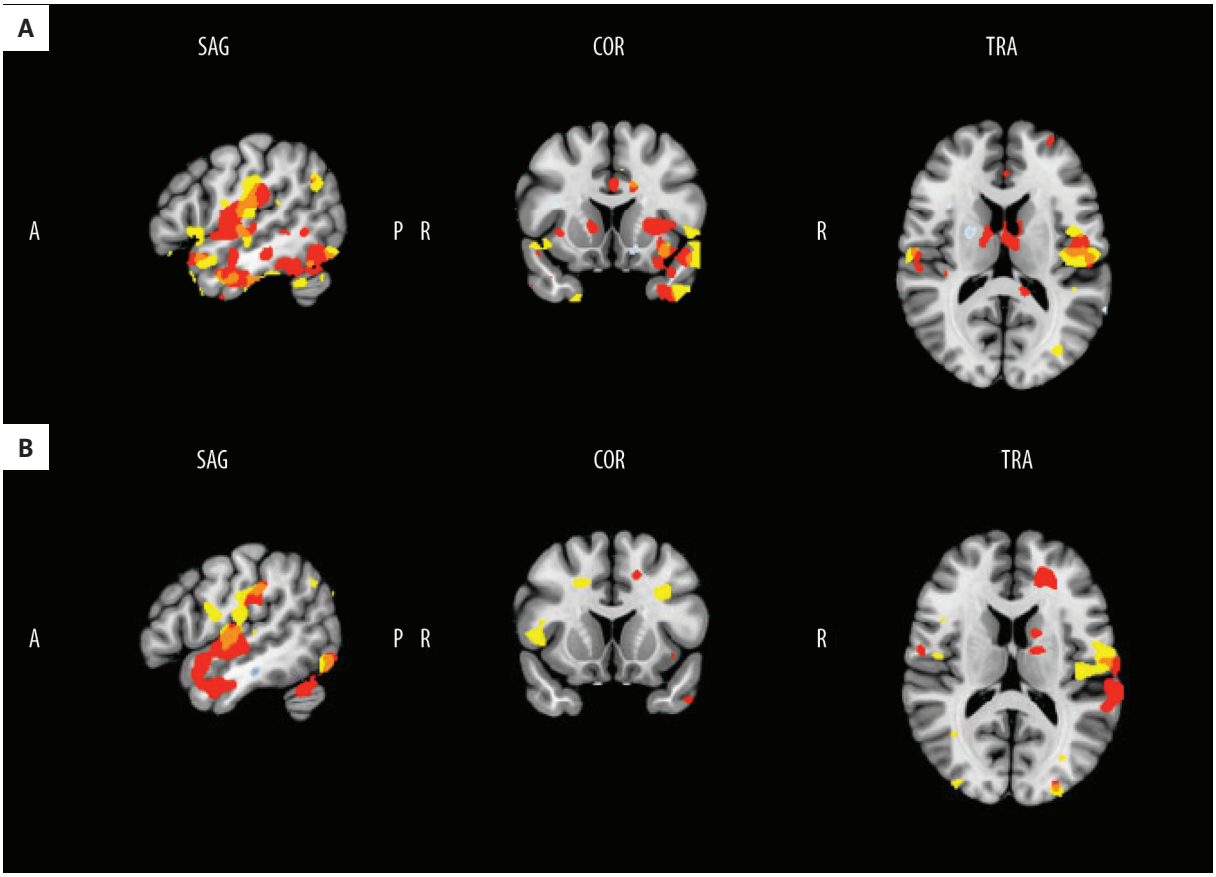
„Kończenie zdań": SingleShot EPI w płaszczyźnie *axial* o rozdzielczości anizotropowej 2 × 2 × 2,4 mm, TR = 2000 ms, TE = 27 ms, *flip angle* = 90, FOV = 192 × 192 mm, matrix 64 × 64, 37 warstw, grubość warstwy: 2,4 mm, liczba wolumenów = 160, czas akwizycji TA= 5.3 min.

### *Opracowanie i analiza wyników badań*

Dane obrazowe analizowano przy użyciu oprogramowania BrainVoyager QX 21.2 (Brain Innovation, Maastricht, Holandia). Przygotowanie obrazów do analizy (ang. *preprocessing*) odbyło się z zastosowaniem standardowych procedur składających się z korekcji ruchu głowy w trzech wymiarach (interpolacja trójliniowa) oraz usunięcia dryftów liniowych i niskoczęstotliwościowych dryftów nieliniowych (filtr górnoprzepustowy). Obraz anatomiczny przekształcono do przestrzeni MNI, a uzyskana transformacja została zastosowana do wyrównanych danych funkcjonalnych. Wszystkie obrazy funkcjonalne były rejestrowane z obrazem anatomicznym. Odniesienie skanu czynnościowego do przestrzeni natywnej z obrazu mózgu T1 (rozdzielczość: 1 × 1 × 1 mm) i przestrzennej filtracji wygładzającej (filtr gaussowski FWHM = 6 mm). Do modelowania zmian sygnału BOLD zastosowano filtrację filtrem górnoprzepustowym o czasie 128 s.

W przypadku każdego uczestnika indywidualnie zdefiniowano model liniowy (GLM), w którym warunki eksperymentalne modelowano za pomocą funkcji typu *boxcar*, splotowanych z kanoniczną funkcją odpowiedzi hemodynamicznej (ang. *hemodynamic response function*, HRF; model 2-Gamma stosowany w BrainVoyager). Do modelu włączono sześć parametrów ruchu głowy jako regresory zakłócające (ang. *nuisance regressors*). Dla każdego uczestnika wygenerowano mapy kontrastów odzwierciedlające aktywację związaną z wykonywaniem zadania, które następnie zostały wykorzystane w analizie grupowej.

Na poziomie drugiego rzędu indywidualne mapy kontrastów wprowadzono do grupowego modelu GLM, w którym przeprowadzono testy *t* dla jednej próby (ang. *one-sample t-tests*) w celu oceny efektów wewnątrzgrupowych. Ze względu na niewielką liczebność próby oraz zróżnicowany wiek nabycia L2 dodatkowo dokonano wzrokowej




**Rycina 6. A**) Aktywacja mózgowa OB3 w odpowiedzi na zadanie dot. generowania czasowników w myślach, kolorem czerwony kolor prezentuje aktywację dla L1 (język polski), żółty – aktywację dla L2 (rosyjski, uczony od urodzenia, używany w środowisku rodzinnym). **B**) Aktywacja mózgowa OB3 w odpowiedzi na zadanie dot. generowania w myślach zakończenia przeczytanych zdań; kolor czerwony prezentuje aktywacje dla L1 (język polski), żółty – aktywację dla L2 (rosyjski, uczony od urodzenia, używany w środowisku rodzinnym)
**Figure 6. A**) Brain activation in participant OB3 in response to the verb-generation task performed mentally; red indicates activation for L1 (Polish), and yellow indicates activation for L2 (Russian, learned from birth and used in the family environment). **B**) Brain activation in participant OB3 in response to the task of mentally completing read sentences; red indicates activation for L1 (Polish), and yellow indicates activation for L2 (Russian, learned from birth and used in the family environment)

oceny map aktywacji uzyskanych podczas wykonywania zadań w L1 i L2.

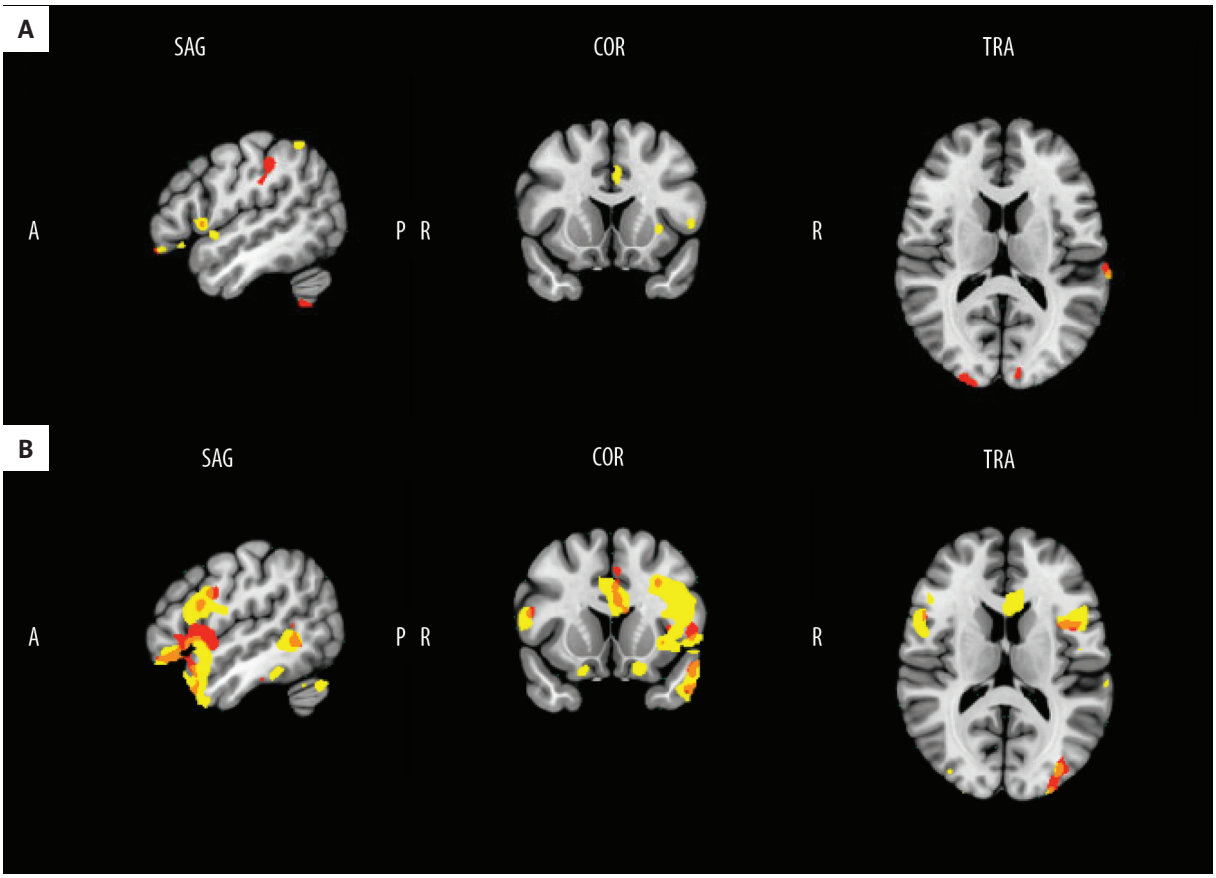
Klastry zostały przedstawione w przestrzeni MNI i zobrazowane na domyślnym modelu mózgu MNI w programie BrainVoyager. We wszystkich porównaniach zastosowano próg istotności dla wokseli $p < 0{,}005$, skorygowany pod kątem wielokrotnych porównań przy użyciu wtyczki ClusterThresh z symulacją Monte Carlo (1000 iteracji dla każdej mapy kontrastu). Odpowiada to progowi wielkości klastra równemu $p < 0{,}05$, co ogranicza ryzyko błędów I rodzaju, jednocześnie umożliwiając wykrycie rzeczywistych aktywacji. Lokalizację anatomiczną istotnych klastrów określano przy użyciu atlasu Harvard–Oxford.

## Wyniki

Analiza indywidualnych aktywacji mózgowych uczestników badania ujawnia duże zróżnicowanie wyników (**ryciny 4A–9B**)

Wzrokowa analiza map aktywacji podczas wykonywania zadań w L1 i L2 wykazała, że u OB1 (**ryciny 4A i 4B**) zaobserwowano zbliżony wzorzec aktywacji dla obu języków w obu zadaniach. W przypadku OB2 (**ryciny 5A i 5B**) wystąpił wzorzec odwrotny niż oczekiwany – aktywność mózgowa była bardziej rozproszona dla L1 w zadaniu „Kończenie zdań" niż dla L2. Może to wynikać z faktu, że L2 nauczany był od urodzenia, była to tzw. dwujęzyczność równoczesna. U OB3 (**ryciny 6A i 6B**) w zadaniu „Fluencja słowna – czasowniki" mapy aktywacji były podobne dla obu języków, natomiast w zadaniu „Kończenie zdań" zaobserwowano wyraźne rozdzielenie aktywności między górną i dolną drogą językową (L2: aktywność ograniczona do obszarów czołowych, L1: aktywność w rejonach skroniowych). U OB4 (**ryciny 7A i 7B**) odnotowano najmniejszy ogólny poziom aktywacji mózgowej w obu zadaniach, jednak obecny w głównych obszarach językowych. OB5 (**ryciny 8A i 8B**) wykazała wyższą aktywność w obszarach czołowych dla L2 w porównaniu do L1, zarówno w zadaniu dotyczącym czasowników, jak i zdań. Aktywność mózgowa OB6 (**ryciny 9A i 9B**) była rozproszona w obu zadaniach dla obu języków.

Na **rycinach 10A i 10B** zaprezentowano zbiorcze wyniki analiz grupowych dla zadań „Fluencja słowna – czasowniki" (2A) oraz „Kończenie zdań" (2B), uzyskane na podstawie testów *t* dla jednej próby (ang. *one-sample*




**Rycina 7. A**) Aktywacja mózgowa OB4 w odpowiedzi na zadanie dot. generowania czasowników w myślach; kolor czerwony prezentuje aktywację dla L1 (język polski), żółty – aktywację dla L2 (rosyjski, uczony od 3 roku życia, używany w środowisku rodzinnym), pomarańczowy oznacza pokrywające się obszary dla L1 i L2. **B**) Aktywacja mózgowa OB4 w odpowiedzi na zadanie dot. generowania w myślach zakończenia przeczytanych zdań; kolor czerwony prezentuje aktywację dla L1 (język polski), żółty – aktywację dla L2 (rosyjski, uczony od 3 roku życia, używany w środowisku rodzinnym), pomarańczowy oznacza pokrywające się obszary dla L1 i L2

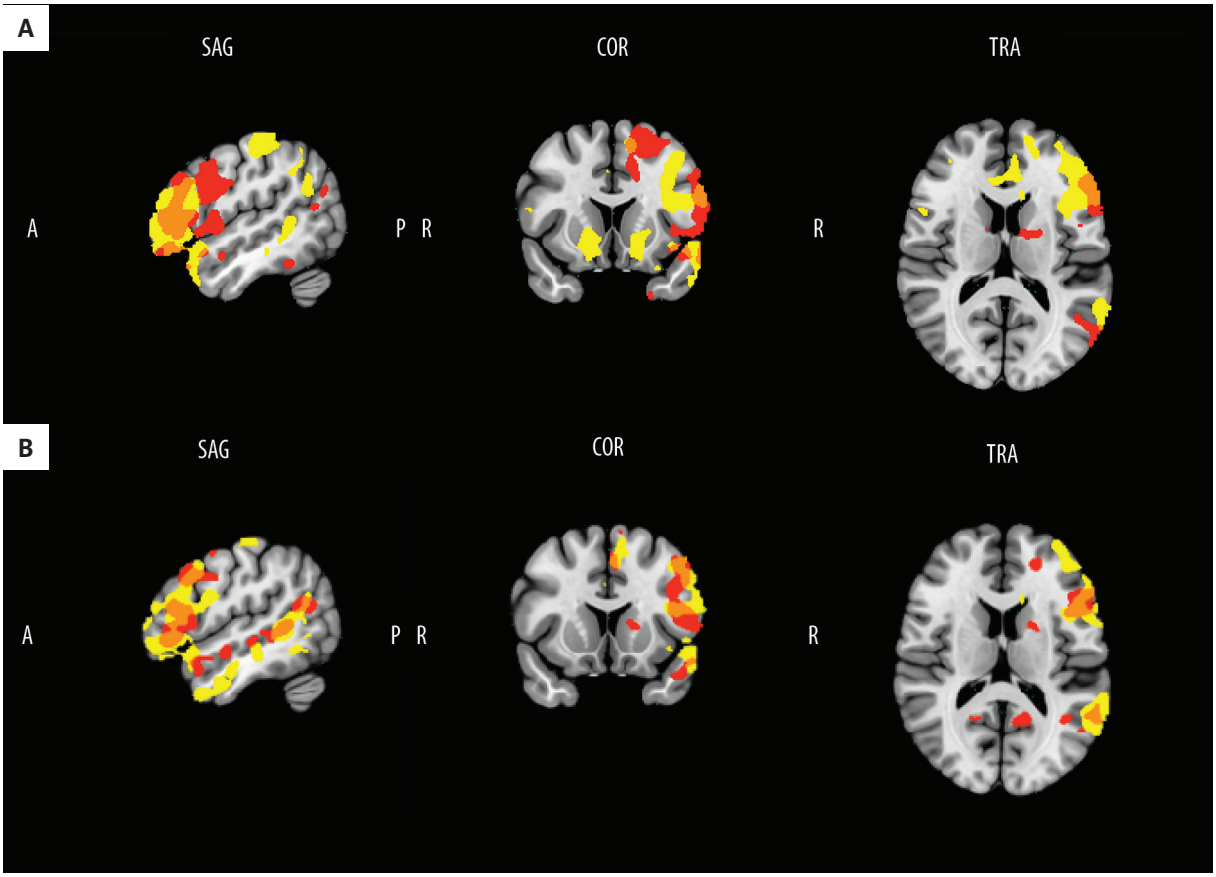
**Figure 7. A**) Brain activation in participant OB4 in response to the verb-generation task performed mentally; red indicates activation for L1 (Polish), yellow indicates activation for L2 (Russian, learned from age 3 and used in the family environment), and orange indicates overlapping areas for L1 and L2. **B**) Brain activation in participant OB4 in response to the task of mentally completing read sentences; red indicates activation for L1 (Polish), yellow indicates activation for L2 (Russian, learned from age 3 and used in the family environment), and orange indicates overlapping areas for L1 and L2

*t-tests*), przeprowadzonych na mapach kontrastów indywidualnych uczestników. W **tabelach 2 i 3** przedstawiono obszary mózgu, w których odnotowano istotny wzrost sygnału BOLD podczas zadania fluencji słownej dla czasowników odpowiednio dla języka pierwszego (L1) i drugiego (L2). Analogicznie w **tabelach 4 i 5** przedstawiono obszary mózgu wykazujące istotny wzrost sygnału podczas zadania kończenia zdań odpowiednio dla L1 i L2.

W warunku „Fluencja słowna – czasowniki" w języku pierwszym (**tabela 2**, **rycina 10A**) zaobserwowano aktywację w klasycznych obszarach sieci językowej lewej półkuli, w tym w zakręcie czołowym dolnym (BA44/45), zakręcie skroniowym górnym oraz zakręcie ciemieniowym dolnym. Aktywowane były także obszary prawej półkuli homologiczne do klasycznych regionów językowych, m.in. prawy zakręt skroniowy dolny (co może odzwierciedlać współdziałanie mechanizmów integrujących informacje pragmatyczne i emocjonalne w kontekście tego zadania [40]). Dodatkowo wykazano aktywność w zakręcie językowatym oraz w strukturach zaangażowanych w przetwarzanie wzrokowe, co zapewne odzwierciedla obecność komponentu wizualnego podczas prezentacji bodźców. Zauważono również istotną aktywność móżdżkową.

W warunku „Fluencja słowna – czasowniki" w L2 (**tabela 3**, **rycina 10A**) aktywowana była lewostronna część trójdzielna zakrętu czołowego dolnego (obszar Broki, BA45), a także jej prawostronny odpowiednik. Zaobserwowano również aktywację przyśrodkowej kory przedczołowej, co może sugerować zaangażowanie procesów kontrolnych i wykonawczych podczas przetwarzania języka drugiego. Zarejestrowano także istotne wzbudzenie w korze wzrokowej (V1/V2).

Podczas kończenia zdań w języku pierwszym (**tabela 4**, **rycina 10B**) stwierdzono aktywację w klasycznych lewostronnych obszarach językowych, w tym w zakręcie czołowym dolnym (część oczodołowa i trójdzielna) oraz w zakręcie skroniowym górnym. Aktywowana była również kora ciemieniowa (głównie dolny płacik ciemieniowy), prawdopodobnie wspierająca integrację semantyczno-syntaktyczną. Istotną aktywność odnotowano także w zakręcie językowatym i potylicznym dolnym,



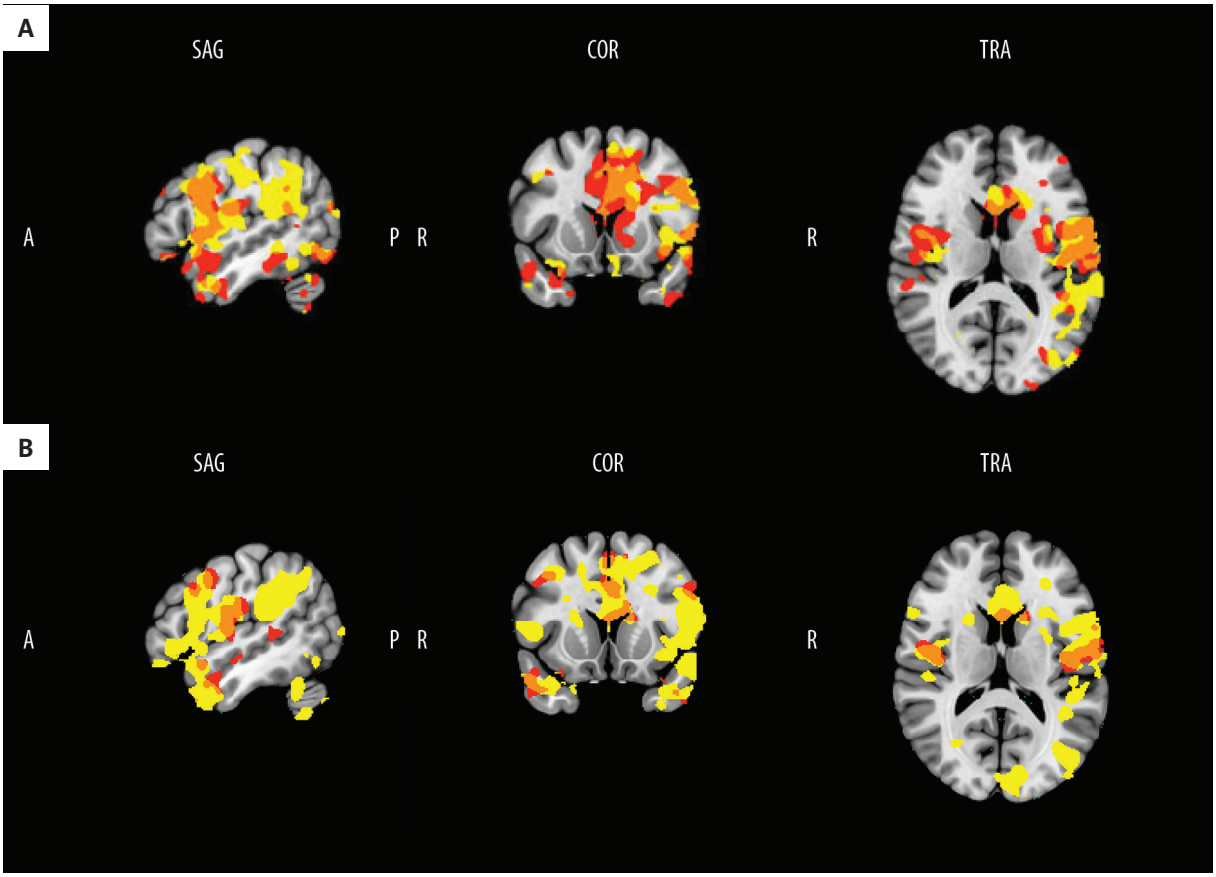

**Rycina 8. A**) Aktywacja mózgowa OB5 w odpowiedzi na zadanie dot. generowania czasowników w myślach; kolor czerwony prezentuje aktywację dla L1 (język rosyjski), żółty – aktywację dla L2 (angielski, uczony od 14 roku życia, używany w środowisku rodzinnym i pracy), pomarańczowy oznacza pokrywające się obszary dla L1 i L2. **B**) Aktywacja mózgowa OB5 w odpowiedzi na zadanie dot. generowania w myślach zakończenia przeczytanych zdań; kolor czerwony prezentuje aktywację dla L1 (język polski), żółty – aktywację dla L2 (angielski, uczony od 14 roku życia, używany w środowisku rodzinnym i pracy), pomarańczowy oznacza pokrywające się obszary dla L1 i L2
**Figure 8. A**) Brain activation in participant OB5 in response to the verb-generation task performed mentally; red indicates activation for L1 (Russian), yellow indicates activation for L2 (English, learned from age 14 and used in the family and work environment), and orange indicates overlapping areas for L1 and L2. **B**) Brain activation in participant OB5 in response to the task of mentally completing read sentences; red indicates activation for L1 (Polish), yellow indicates activation for L2 (English, learned from age 14 and used in the family and work environment), and orange indicates overlapping areas for L1 and L2

co podobnie do wcześniejszego zadania, wskazuje na zaangażowanie komponentów przetwarzania wzrokowego. Prawostronna aktywność może odzwierciedlać współdziałanie mechanizmów integrujących informacje pragmatyczne i emocjonalne w kontekście zadania.

W warunku kończenia zdań w L2 (**tabela 5**, **rycina 10B**) aktywowane były zarówno lewostronne, jak i prawostronne struktury kory skroniowej (zakręt skroniowy środkowy i dolny), a także zakręt przyhipokampowy, szczególnie w prawej półkuli. Zaobserwowano też aktywność w przyśrodkowej korze przedczołowej, co może świadczyć o wzmożonej kontroli poznawczej podczas selekcji i integracji odpowiedzi językowej w L2. Silna aktywacja w obszarach związanych z pamięcią deklaratywną sugeruje zaangażowanie systemów pamięciowych podczas przetwarzania i produkcji zdań w L2.

Zarówno na poziomie analiz indywidualnych (**ryciny 3A – 9B**), jak i grupowych (**ryciny 10A i 2B**, **tabele 2–5**) dla obu zadań odnotowano aktywacje w regionach odpowiadających klasycznym obszarom językowym, w tym ośrodkowi Broki (zakręt czołowy dolny) oraz ośrodkowi Wernickego (tylna część zakrętu skroniowego górnego). Zaobserwowano także: aktywność w regionach mózgu zaangażowanych we wzrokowe rozpoznawanie liter [41], procesy uwagowe, integrację informacji fonologicznej i semantycznej (lewy zakręt ciemieniowy), automatyzację procesów generowania słów (móżdżek), podejmowanie decyzji, selekcję odpowiedzi oraz kontrolę wykonawczą (zakręt czołowy dolny prawej i lewej półkuli mózgu), a także inicjowanie i podtrzymywanie aktywności językowej (przyśrodkowy zakręt czołowy, część przednia lewej półkuli).

W przypadku języka pierwszego zaobserwowano selektywną oraz powtarzalną między osobami badanymi aktywność w obrębie obszarów wchodzących w skład typowej sieci językowej. Natomiast dla języka drugiego wzorzec aktywności mózgowej był rozproszony, z wyraźnym zróżnicowaniem międzyosobniczym. Zauważono również aktywność przedczołową i przyhipokampową w L2 (zwłaszcza podczas kończenia zdań). Wskazuje to na zaangażowanie kontroli poznawczej i pamięci




**Rycina 9. A**) Aktywacja mózgowa OB6 w odpowiedzi na zadanie dot. generowania czasowników w myślach; kolor czerwony prezentuje aktywację dla L1 (język rosyjski), żółty – aktywację dla L2 (angielski, uczony od 6 roku życia, używany w środowisku rodzinnym i pracy), pomarańczowy oznacza pokrywające się obszary dla L1 i L2. **B**) Aktywacja mózgowa OB6 w odpowiedzi na zadanie dot. generowania w myślach zakończenia przeczytanych zdań; kolor czerwony prezentuje aktywację dla L1 (język polski), żółty – aktywację dla L2 (angielski, uczony od 6 roku życia, używany w środowisku rodzinnym i pracy), pomarańczowy oznacza pokrywające się obszary dla L1 i L2

**Figure 9. A**) Brain activation in participant OB6 in response to the verb-generation task performed mentally; red indicates activation for L1 (Russian), yellow indicates activation for L2 (English, learned from age 6 and used in the family and work environment), and orange indicates overlapping areas for L1 and L2. **B**) Brain activation in participant OB6 in response to the task of mentally completing read sentences; red indicates activation for L1 (Polish), yellow indicates activation for L2 (English, learned from age 6 and used in the family and work environment), and orange indicates overlapping areas for L1 and L2

deklaratywnej, co jest zgodne z modelami neurokognitywnymi dwujęzyczności [42].

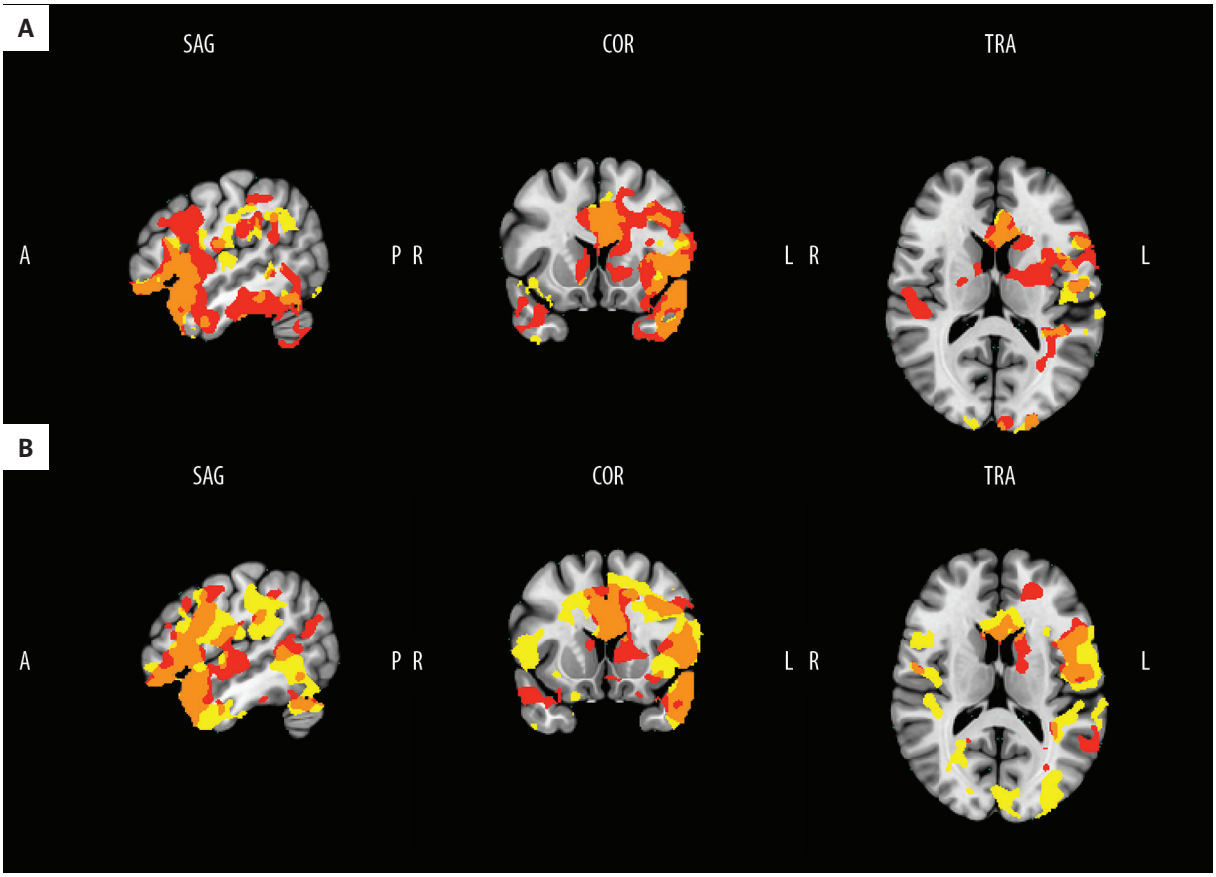
## Dyskusja

W standardowym protokole klinicznego mapowania funkcji mowy nie uwzględnia się oceny obu języków [43]. Istnieją jednak ku temu coraz mocniejsze przesłanki wynikające z faktu, że coraz więcej pacjentów funkcjonuje na co dzień w środowisku co najmniej dwujęzycznym, używając regularnie przynajmniej dwóch języków zarówno w kontekstach zawodowych, jak i prywatnych [12]. Włączenie zatem mapowania dwóch języków (wykorzystywanych na co dzień przez badanych) do rutynowych procedur diagnostycznych może mieć istotne znaczenie dla poprawy jakości życia pacjentów po interwencji neurochirurgicznej, umożliwiając im skuteczniejszy powrót do pełnionych wcześniej funkcji zawodowych i społecznych [44].

W prezentowanym badaniu własnym przeanalizowano wzorce aktywacji neuronalnej towarzyszące realizacji dwóch klasycznych zadań językowych, szeroko stosowanych w przedoperacyjnym mapowaniu mowy, osobno dla języków pierwszego i drugiego. W przypadku obu zadań i obu języków zaobserwowaliśmy aktywność w regionach klasycznej sieci językowej, obejmującej między innymi lewy dolny zakręt czołowy (IFG) oraz zakręt skroniowy górny z wyraźną dominacja lewej półkuli mózgu. Ten wzorzec był spójny zarówno na poziomie indywidualnym, jak i grupowym, co stanowi potwierdzenie wiarygodności stosowanych paradygmatów [45].

Pomimo różnic pomiędzy badanymi językami (polskim, angielskim i rosyjskim), ogólny wzorzec aktywności mózgowej pozostawał podobny, co sugeruje istnienie wspólnych neuronalnych mechanizmów przetwarzania językowego, niezależnych od specyfiki konkretnego języka [19].

Jednocześnie, podczas wzrokowej inspekcji map aktywności mózgowej podczas zadań wykonywanych w L1 oraz L2, zaobserwowaliśmy różnice we wzorcach odpowiedzi hemodynamicznej. Podczas wykonywania zadań językowych w L2 odnotowaliśmy rozproszoną aktywność neuronalną




**Rycina 10. A**) Aktywacja mózgowa na poziomie grupowym w odpowiedzi na zadanie dot. generowania czasowników w myślach; kolor czerwony prezentuje aktywację dla L1, żółty – aktywację dla L2, pomarańczowy oznacza pokrywające się obszary dla L1 i L2. **B**) Aktywacja mózgowa na poziomie grupowym w odpowiedzi na zadanie dot. kończenia zdań w myślach; kolor czerwony prezentuje aktywację dla L1, żółty – aktywację dla L2, pomarańczowy oznacza pokrywające się obszary dla L1 i L2

**Figure 10. A**) Group-level brain activation in response to the verb-generation task performed mentally; red indicates activation for L1, yellow indicates activation for L2, and orange indicates overlapping areas for L1 and L2. **B**) Group-level brain activation in response to the sentence-completion task performed mentally; red indicates activation for L1, yellow indicates activation for L2, and orange indicates overlapping areas for L1 and L2

oraz silną aktywację lewego IFG. Zgodnie z wcześniejszymi badaniami obszar ten uczestniczy nie tylko w planowaniu i generowaniu wypowiedzi słownych oraz integracji semantyczno-syntaktycznej, lecz także odgrywa zasadniczą rolę w mechanizmach kontroli poznawczej w kontekście językowym [24]. Silna aktywność IFG w kontekście L2 może zatem odzwierciedlać mniejszy stopień automatyzacji produkcji językowej i konieczność większego zaangażowania kontroli wykonawczej podczas generowania mowy w L2 (mniej zautomatyzowanym języku) [31]. Aktywacja przyhipokampowa, szczególnie widoczna w zadaniu dotyczącym kończenia zdań w L2, wskazuje na wykorzystanie pamięci deklaratywnej oraz mechanizmów wspierających wyszukiwanie i integrowanie informacji językowych [19].

Analiza aktywności mózgowej towarzyszącej poszczególnym zadaniom ujawniła, że zadanie „Fluencja słowna – czasowniki" aktywowała regiony ciemieniowe, wspierające procesy uwagowe i fonologiczne, natomiast „Kończenie zdań" angażowało obszary związane z pamięcią i kontrolą poznawczą (m.in. zakręt przyhipokampowy oraz przyśrodkową korę przedczołową). Ten wzorzec jest zgodny z wcześniejszymi badaniami wskazującymi na silniejszy udział sieci pamięci semantycznej i procesów integracyjnych podczas bardziej złożonych operacji składniowo-semantycznych [24].

Warto także podkreślić aktywność prawej półkuli podczas przetwarzania L2 – aktywowane były m.in. prawy dolny zakręt czołowy oraz obszary skroniowe prawostronnie. Może to odzwierciedlać kompensacyjną rekrutację zasobów neuronalnych w odpowiedzi na wyższe wymagania poznawcze związane z generowaniem wypowiedzi w mniej biegłym języku, co również znajduje potwierdzenie w literaturze [31,46]. Aktywność ta może również odzwierciedlać współdziałanie mechanizmów integrujących informacje pragmatyczne i emocjonalne podczas wykonywania zadań językowych [40].

Obserwowane aktywacje w zakręcie językowatym i obszarach kory wzrokowej (V1/V2) w obu językach, niezależnie od typu zadania, wskazują na istotny udział procesów przetwarzania wizualnego podczas prezentacji bodźców. Wynik ten jest zgodny z doniesieniami Ghosh i wsp. [41], w których autorzy podkreślają znaczenie wizualnego rozpoznawania liter w procesach językowych.

**Tabela 2.** Obszary aktywacji mózgu podczas zadania „Fluencja słowna – czasowniki" w L1 na poziomie grupowym
**Table 2.** Group-level brain activation in the task "Verbal Fluency – Verbs" for L1

| Obszar mózgu | Półkula | Koordynaty MNI | | | Statystyka *t* | Wielkość klastra |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | x | y | z | | |
| **Zakręt czołowy dolny** | **prawa** | **50** | **–28** | **18** | **5,60** | **4304** |
| **Zakręt czołowy dolny** | **lewa** | **–49** | **8** | **0** | **10,56** | **95 744** |
| **Zakręt językowaty** | **prawa** | **18** | **–89** | **–29** | **6,76** | **13 979** |
| **Pole wzrokowe (V1/V2)** | **lewa** | **–21** | **–103** | **4** | **7,53** | **3007** |
| **Móżdżek** | **lewa** | **–48** | **–58** | **–52** | **4,94** | **891** |
| Zakręt skroniowy dolny | prawa | 70 | –17 | –21 | 6,60 | 6878 |
| Zakręt ciemieniowy górny | lewa | –35 | –65 | 37 | 6,94 | 5485 |
| Zakręt ciemieniowy dolny | lewa | –62 | –33 | 32 | 7,21 | 3428 |
| Zakręt skroniowy górny | lewa | –36 | –45 | 15 | 4,74 | 958 |
| Zakręt wrzecionowaty | prawa | 25 | –81 | –11 | 5,06 | 907 |
| Zakręt ciemieniowy górny | lewa | –20 | –61 | 36 | 5,27 | 690 |
| Zakręt skroniowy dolny | prawa | 55 | –50 | –17 | 5,50 | 668 |
| Zakręt skroniowy dolny | prawa | 37 | –71 | –11 | 5,30 | 665 |
| | | | | | Suma aktywnych wokseli | **137 604** |

Opis: Pogrubionym drukiem zaznaczono obszary aktywne w obu językach podczas produkcji czasowników w myśli.

**Tabela 3.** Obszary aktywacji mózgu podczas zadania „Fluencja słowna – czasowniki" w L2 na poziomie grupowym
**Table 3.** Group-level brain activation in the task "Verbal Fluency – Verbs" for L2

| Obszar mózgu | Półkula | Koordynaty MNI | | | Statystyka *t* | Wielkość klastra |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | x | y | z | | |
| **Zakręt czołowy dolny** | **prawa** | **42** | **13** | **–10** | **6,09** | **1083** |
| **Zakręt czołowy dolny** | **lewa** | **–49** | **31** | **–16** | **10,27** | **57 723** |
| **Zakręt językowaty** | **prawa** | **26** | **–81** | **–32** | **6,53** | **5340** |
| **Pole wzrokowe (V1/V2)** | **lewa** | **–31** | **–102** | **3** | **7,68** | **4066** |
| **Móżdżek** | **lewa** | **–30** | **–76** | **–38** | **5,10** | **655** |
| Przyśrodkowy zakręt czołowy | lewa | –7 | 20 | 29 | 9,34 | 17 129 |
| Pole wzrokowe (V1/V2) | prawa | 15 | –103 | 3 | 5,95 | 2092 |
| Istota szara okołowodociągowa | lewa | –8 | –20 | –9 | 5,45 | 1638 |
| Zakręt przyhipokampowy | lewa | –20 | 2 | –18 | 5,62 | 923 |
| | | | | | Suma aktywnych wokseli | **90 649** |

Opis: Pogrubionym drukiem zaznaczono obszary aktywne w obu językach podczas produkcji czasowników w myśli.

Różnice w wielkości klastrów i rozproszeniu aktywacji (zaobserwowane podczas wzrokowej inspekcji obrazów) między L1 i L2 sugerują, że reprezentacje neuronalne języka drugiego są bardziej zróżnicowane i mniej stabilne, co może wynikać z indywidualnych różnic – wieku nabycia języka, poziomu biegłości i częstotliwości jego używania. Czynniki te są dobrze znanymi moderatorami organizacji sieci językowych [19] i mogły przyczynić się do uzyskanych wyników. W przyszłych badaniach warto uwzględnić większą i bardziej jednorodną grupę uczestników oraz przeprowadzić analizę koniunkcyjną (L1 ∩ L2), która pozwoliłaby precyzyjniej zidentyfikować obszary wspólne i specyficzne dla obu języków.

Biorąc pod uwagę stosunkowo duże zróżnicowanie międzyosobnicze w zakresie aktywności neuronalnej podczas zadań angażujących L2 u osób z „późną" dwujęzycznością, szczególnie w tej grupie osób, zasadne jest uwzględnienie

**Tabela 4.** Obszary mózgu aktywne podczas zadania „Kończenie zdań" w L1 na poziomie grupowym
**Table 4.** Group-level brain activation in the task "Sentence Completion" for L1

| Obszar mózgu | Półkula | Koordynaty MNI | | | Statystyka *t* | Wielkość klastra |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | x | y | z | | |
| **Zakręt skroniowy dolny** | **prawa** | **60** | **–29** | **–21** | **5,63** | **1438** |
| **Zakręt ciemieniowy dolny** | **prawa** | **22** | **–54** | **23** | **4,42** | **654** |
| Zakręt czołowy dolny | lewa | –48 | 5 | –25 | 9,34 | 66 583 |
| Móżdżek | lewa | –67 | –18 | –31 | 7,76 | 24 770 |
| Zakręt językowaty | prawa | 26 | –89 | –37 | 5,48 | 7064 |
| Zakręt językowaty | lewa | –15 | –87 | –16 | 5,36 | 2519 |
| Zakręt skroniowy górny | lewa | –69 | –31 | –2 | 7,72 | 1852 |
| Zakręt czołowy górny | lewa | –22 | 45 | 15 | 5,35 | 1162 |
| Zakręt czołowy dolny | prawa | 54 | 18 | –23 | 4,80 | 1073 |
| Płat potyliczny dolny | prawa | 29 | –98 | –15 | 4,69 | 902 |
| Zakręt czołowy dolny | lewa | –29 | 35 | –23 | 5,07 | 831 |
| Zakręt czołowy dolny | prawa | 52 | –6 | 18 | 4,84 | 704 |
| | | | | | Suma aktywnych wokseli | **109 952** |

Opis: Pogrubionym drukiem zaznaczono obszary aktywne w obu językach podczas kończenia zdań.

**Tabela 5.** Obszary aktywacji mózgu podczas zadania „Kończenie zdań" w L2 na poziomie grupowym
**Table 5.** Group-level brain activation in the task "Sentence Completion" for L2

| Obszar mózgu | Półkula | Koordynaty MNI | | | Statystyka *t* | Wielkość klastra |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | x | y | z | | |
| **Zakręt skroniowy dolny** | **prawa** | **48** | **6** | **–32** | **6,34** | **1374** |
| **Zakręt ciemieniowy dolny** | **prawa** | **31** | **–67** | **23** | **5,66** | **7820** |
| Przyśrodkowy zakręt czołowy | lewa | –4 | 20 | 26 | 10,03 | 15 5114 |
| Zakręt przyhipokampowy | lewa | –22 | 5 | –22 | 6,73 | 4320 |
| Zakręt przyhipokampowy | prawa | 20 | 10 | –24 | 5,49 | 2832 |
| Zakręt skroniowy środkowy | prawa | 50 | –34 | –23 | 6,29 | 2197 |
| Zakręt skroniowy środkowy | prawa | 40 | –34 | 16 | 5,30 | 1004 |
| | | | | | Suma aktywnych wokseli | **174 661** |

Opis: Pogrubionym drukiem zaznaczono obszary aktywne w obu językach podczas kończenia zdań.

w protokołach obu języków, aby zminimalizować ryzyko zaburzeń w zakresie L2 po planowanej interwencji neurochirurgicznej. W przypadku osób z „wczesną" dwujęzycznością zasadniczo spodziewamy się podobnego wzorca aktywności dla obu języków, więc w tym przypadku zbadanie jednego języka może być wystarczające.

Jak wspomniano powyżej, ograniczeniem niniejszego badania jest niewielka liczebność badanej grupy, która dodatkowo różniła się pod względem poziomu znajomości poszczególnych języków, częstotliwości ich używania oraz czasu nabycia L2. Te czynniki są silnymi modulatorami organizacji neuronalnej dwujęzyczności – wcześniejsze badania wskazują, że języki nabyte we wczesnym dzieciństwie mogą dzielić w większym stopniu reprezentacje neuronalne z L1, podczas gdy języki przyswojone w późniejszym wieku aktywują bardziej rozproszone lub zróżnicowane sieci [19]. Czynniki te mogły wpłynąć na uzyskane rezultaty oraz ograniczyć możliwość generalizacji wniosków, natomiast dobrze odzwierciedlają zróżnicowanie populacji osób dwujęzycznych.

W niniejszym badaniu zastosowano paradygmaty (fluencja słowna i kończenie zdań), które silnie angażują składnik wykonawczy języka. W celu uzyskania pełniejszej charakterystyki sieci dwujęzycznej warto w kolejnych projektach

uwzględnić paradygmaty percepcyjne (np. pasywne słuchanie zdań), co pozwoli ocenić, czy obserwowane różnice utrzymują się także podczas procesów recepcyjnych. Wartościowym kierunkiem dalszych badań byłoby porównanie funkcjonowania językowego przed interwencja neurochirurgiczną i po niej, co pozwoliłoby ocenić, czy stopień zachowania lub zaburzenia funkcji mowy jest podobny w obu językach. Wprowadzenie rozszerzonej procedury dwujęzycznego mapowania przed- i pooperacyjnego do praktyki klinicznej mogłoby znacząco poprawić jakość opieki nad pacjentami dwujęzycznymi.

## Wnioski

Badanie potwierdziło, że klasyczne paradygmaty językowe pozwalają na efektywne mapowanie sieci językowej zarówno dla L1, jak i L2. Wykazano, że pomimo ogólnego podobieństwa wzorców aktywacji język drugi silnie angażował obszary wykonawcze, co może wynikać z mniejszego stopienia automatyzacji procesów językowych. Wyniki wspierają zasadność uwzględniania obu języków w mapowaniu przedoperacyjnym. Dalsze badania powinny objąć ocenę funkcji językowych w L1 i L2 po interwencji neurochirurgicznej.

## Finansowanie

Niniejsze badania i artykuł nie otrzymały żadnej dotacji od agencji działających w sektorze publicznym, komercyjnym lub non-profit.

## Piśmiennictwo

1. Silva MA, See AP, Essayed WI, Golby AJ, Tie Y. Challenges and techniques for presurgical brain mapping with functional MRI. Neuroimage Clin, 2018; 17: 794–803; https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nicl.2017.12.008
2. Pluta A, Wolak T, Skarżyński H. Badanie dominacji półkulowej dla funkcji mowy z zastosowaniem techniki rezonansu magnetycznego. Now Audiofonol, 2014; 3(3): 9–16; https://doi.org/10.17431/891108.
3. Fedorenko E, Ivanova AA, Regev TI. The language network as a natural kind within the broader landscape of the human brain. Nat Rev Neurosci, 2024; 25(5): 289–312; https://doi.org/10.1038/s41583-024-00802-4.
4. Hickok G, Poeppel D. Neural basis of speech perception. Handb Clin Neurol, 2015; 129: 149–60; https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62630-1.00008-1.
5. Anderson JM, Gilmore R, Roper S, Crosson B, Bauer RM, Nadeau S i wsp. Conduction aphasia and the arcuate fasciculus: a reexamination of the Wernicke-Geschwind model. Brain Lang, 1999; 70(1): 1–12; https://doi.org/10.1006/brln.1999.2135.
6. Menenti L, Gierhan SME, Segaert K, Hagoort P. Shared language: overlap and segregation of the neuronal infrastructure for speaking and listening revealed by functional MRI. Psychol Sci, 2011; 22(9): 1173–82; https://doi.org/10.1177/0956797611418347.
7. Hu J, Small H, Kean H, Takahashi A, Zekelman L, Kleinman D i wsp. Precision fMRI reveals that the language-selective network supports both phrase-structure building and lexical access during language production. Cereb Cortex, 2023; 33(8): 4384–404; https://doi.org/10.1093/cercor/bhac350.
8. Tuckute G, Kanwisher N, Fedorenko E. Language in brains, minds, and machines. Annu Rev Neurosci, 2024; 47(1): 277–301; https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-120623-101142.
9. Hayakawa S, Marian V. Consequences of multilingualism for neural architecture. Behav Brain Funct, 2019; 15(1): 6; https://doi.org/10.1186/s12993-019-0157-z.
10. Pliatsikas C, DeLuca V, Moschopoulou E, Saddy JD. Immersive bilingualism reshapes the core of the brain. Brain Struct Funct, 2017; 222(4): 1785–95; https://doi.org/10.1007/s00429-016-1307-9.
11. Wolak T, Nowak JM, Chaberska I, Kuliński R, Friedman A. Sequence of language acquisition as a factor determining language comprehension centre location in cerebral cortex in sequential multilinguals. Neurol Neurochir Pol, 2025; 59(3): 292–9; https://doi.org/10.5603/pjnns.104340.
12. Grosjean F. The extent of bilingualism. Life as a bilingual: knowing and using two or more languages. Cambridge: Cambridge University Press; 2021, 27–39.
13. The handbook of bilingualism and multilingualism. Bhatia TK, Ritchie WC (red.). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd; 2012.
14. Bialystok E, Craik FIM, Luk G. Bilingualism: consequences for mind and brain. Trends Cogn Sci (Regul Ed), 2012; 16(4): 240–50; https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.03.001.
15. de Bruin A. Not all bilinguals are the same: a call for more detailed assessments and descriptions of bilingual experiences. Behav Sci (Basel), 2019; 9(3); https://doi.org/10.3390/bs9030033.
16. Luk G, Bialystok E. Bilingualism is not a categorical variable: interaction between language proficiency and usage. J Cogn Psychol (Hove), 2013; 25(5): 605–21; https://doi.org/10.1080/20445911.2013.795574.
17. Charlton MH. Aphasia in bilingual and polyglot patients: a neurological and psychological study. J Speech Hear Disord, 1964; 29: 307–11; https://doi.org/10.1044/jshd.2903.301.
18. Kovelman I, Baker SA, Petitto L-A. Bilingual and monolingual brains compared: a functional magnetic resonance imaging investigation of syntactic processing and a possible "neural signature" of bilingualism. J Cogn Neurosci, 2008; 20(1): 153–69; https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20011.
19. Sulpizio S, Del Maschio N, Fedeli D, Abutalebi J. Bilingual language processing: a meta-analysis of functional neuroimaging studies. Neurosci Biobehav Rev, 2020; 108: 834–53; https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.12.014.
20. Dehaene S, Dupoux E, Mehler J, Cohen L, Paulesu E, Perani D i wsp. Anatomical variability in the cortical representation of first and second language. Neuroreport, 1997; 8(17): 3809–15; https://doi.org/10.1097/00001756-199712010-00030.
21. Hahne A, Friederici AD. Processing a second language: late learners' comprehension mechanisms as revealed by event-related brain potentials. Bilingualism, 2001; 4(2): 123–41; https://doi.org/10.1017/S1366728901000232.
22. Hernandez AE, Martinez A, Kohnert K. In search of the language switch: an fMRI study of picture naming in Spanish-English bilinguals. Brain Lang, 2000; 73(3): 421–31; https://doi.org/10.1006/brln.1999.2278.
23. Kim KH, Relkin NR, Lee KM, Hirsch J. Distinct cortical areas associated with native and second languages. Nature, 1997; 388(6638): 171–4; https://doi.org/10.1038/40623.

24. Marian V, Chabal S, Bartolotti J, Bradley K, Hernandez AE. Differential recruitment of executive control regions during phonological competition in monolinguals and bilinguals. Brain Lang, 2014; 139: 108–17; https://doi.org/10.1016/j.bandl.2014.10.005.
25. Abutalebi J, Green DW. Control mechanisms in bilingual language production: neural evidence from language switching studies. Lang Cogn Process, 2008; 23(4): 557–82; https://doi.org/10.1080/01690960801920602.
26. Perani D, Abutalebi J, Paulesu E, Brambati S, Scifo P, Cappa SF 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(3): 170–82; https://doi.org/10.1002/hbm.10110.
27. Wartenburger I, Heekeren HR, Abutalebi J, Cappa SF, Villringer A, Perani D. Early setting of grammatical processing in the bilingual brain. Neuron, 2003; 37(1): 159–70; https://doi.org/10.1016/s0896-6273(02)01150-9.
28. Casey BJ, Giedd JN, Thomas KM. Structural and functional brain development and its relation to cognitive development. Biol Psychol, 2000; 54(1–3): 241–57; https://doi.org/10.1016/s0301-0511(00)00058-2.
29. Skeide MA, Friederici AD. The ontogeny of the cortical language network. Nat Rev Neurosci, 2016; 17(5): 323–32; https://doi.org/10.1038/nrn.2016.23.
30. Skeide MA, Brauer J, Friederici AD. Brain functional and structural predictors of language performance. Cereb Cortex, 2016; 26(5): 2127–39; https://doi.org/10.1093/cercor/bhv042.
31. Liu H, Cao F. L1 and L2 processing in the bilingual brain: a meta-analysis of neuroimaging studies. Brain Lang, 2016; 159: 60–73; https://doi.org/10.1016/j.bandl.2016.05.013.
32. Cargnelutti E, Tomasino B, Fabbro F. Effects of linguistic distance on second language brain activations in bilinguals: an exploratory coordinate-based meta-analysis. Front Hum Neurosci, 2021; 15: 744489; https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.744489.
33. Comstock L. The role of research design in the reproducibility of L1 and L2 language networks: a review of bilingual neuroimaging meta-analyses. Brain Lang, 2024; 249: 105377; https://doi.org/10.1016/j.bandl.2023.105377.
34. Wolna A, Szewczyk J, Diaz M, Domagalik A, Szwed M, Wodniecka Z. Domain-general and language-specific contributions to speech production in a second language: an fMRI study using functional localizers. Sci Rep, 2024; 14(1): 57; https://doi.org/10.1038/s41598-023-49375-9.
35. Bilingual: Life and Reality. 1 ed. Harvard University Press; 2010 [Internet]. Pozyskano z: https://dokumen.pub/bilingual-life-and-reality-1nbsped-9780674056459-9780674048874.html [dostęp: 30.07.2025].
36. Reading-Writing Connections: Towards Integrative Literacy Science. Alves RA, Limpo T, Joshi RM (red). Cham: Springer International Publishing; 2020.
37. Schüppert A, Heeringa W, Golubovic J, Gooskens C. Write as you speak? A cross-linguistic investigation of orthographic transparency in Germanic, Romance and Slavic languages. W: From semantics to dialectometry: Festschrift in honour of John Nerbonne. Wieling M, Kroon M, van Noord G, Bouma G (red.). Groningen: University of Groningen; 2017, s. 303–13.
38. Dong J, Li A, Chen C, Qu J, Jiang N, Sun Y i wsp. Language distance in orthographic transparency affects cross-language pattern similarity between native and non-native languages. Hum Brain Mapp, 2021; 42(4): 893–907; https://doi.org/10.1002/hbm.25266.
39. Seymour PHK, Aro M, Erskine JM. Foundation literacy acquisition in European orthographies. Br J Psychol, 2003; 94(Pt 2): 143–74; https://doi.org/10.1348/000712603321661859.
40. Lojek E, Skotnicka M, Bryan KL. [Set of neuropsychological tests for the assessment of language disorders after damage to the right cerebral hemisphere: preliminary results]. Neurol Neurochir Pol, 2000; 34(1): 71–81.
41. Ghosh S, Basu A, Kumaran SS, Khushu S. Functional mapping of language networks in the normal brain using a word-association task. Indian J Radiol Imaging, 2010; 20(3): 182–7; https://doi.org/10.4103/0971-3026.69352.
42. Ullman MT. A neurocognitive perspective on language: the declarative/procedural model. Nat Rev Neurosci, 2001; 2(10): 717–26; https://doi.org/10.1038/35094573.
43. Benjamin CF, Walshaw PD, Hale K, Gaillard WD, Baxter LC, Berl MM i wsp. Presurgical language fMRI: Mapping of six critical regions. Hum Brain Mapp, 38(8): 4239–55; https://doi.org/10.1002/hbm.23661.
44. Leung LWL, Unadkat P, Bertotti MM, Bi WL, Essayed WI, Bunevicius A i wsp. Clinical utility of preoperative bilingual language fMRI mapping in patients with brain tumors. J Neuroimaging, 2020; 30(2): 175–83; https://doi.org/10.1111/jon.12690.
45. Voets NL, Ashtari M, Beckmann CF, Benjamin CF, Benzinger T, Binder JR i wsp. Consensus recommendations for clinical functional MRI applied to language mapping. Apert Neuro, 2025; 5; https://doi.org/10.52294/001c.128149.
46. Marian V, Spivey M. Competing activation in bilingual language processing: within- and between-language competition. Bilingualism, 2003; 6(2): 97–115; https://doi.org/10.1017/S1366728903001068.



Dr n. biol. Joanna Beck, email: j.beck@ifps.org.pl • 0000-0001-7453-9242
Dr hab. n. społ. Agnieszka Pluta, email: a.pluta@ifps.org.pl • 0000-0002-4684-1919
Tomasz Furtak, email: tm.furtak@student.uw.edu.pl • 0009-0008-6499-571X
Dr hab. n. o zdr. inż. Tomasz Wolak, prof. IFPS, email: t.wolak@ifps.org.pl • 0000-0002-6473-8392