MICHAŁ KLICHOWSKI¹, GRZEGORZ KRÓLICZAK²

¹Wydział Studiów Edukacyjnych

²Wydział Psychologii i Kognitywistyki

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Szamarzewskiego 89, 60-568 Poznań

E-mail: klich@amu.edu.pl

ROLA TYLNEJ CZĘŚCI DOLNEGO ZAKRĘTU SKRONIOWEGO W POWSZEDNICH OBLICZENIACH ARYTMETYCZNYCH

WSTĘP: DLACZEGO NIKT WCZEŚNIEJ
NIE BADAŁ PRZYCZYNOWEJ
ROLI TYLNEJ CZĘŚCI ZAKRĘTU
SKRONIOWEGO DOLNEGO W
OBLICZENIACH ARYTMETYCZNYCH?

Zdolność do umysłowego szacowania liczebności mają zarówno zwierzęta, jak i ludzie. Co ciekawe, w przypadku człowieka potrafią to już nawet niemowlęta. Jednak liczenie, czy też dokładne obliczanie wartości poprzez wykorzystanie jakiegoś typu operacji arytmetycznych, jest charakterystyczne już tylko dla starszych dzieci i osób dorosłych (HOUDE i TZOURIO-MAZOYER 2003, NIEDER 2005). O podłożu neuronalnym tych zdolności mówią zarówno badania neuropsychologiczne prowadzone z udziałem pacjentów, którzy doznali uszkodzeń mózgu, jak i te realizowane z wykorzystaniem metod neuroobrazowania i uczestnictwem osób zdrowych. Uzyskane w tych pracach wyniki pokazują, że kluczowe dla umysłowych obliczeń arytmetycznych obszary mózgu znajdują się w płatach ciemieniowych, zwłaszcza w bruzdzie śródciemieniowej, tylnej części górnego płacika ciemieniowego zarówno lewej, jak i prawej półkuli, a także w lewym zakręcie kątowym i nadbrzeżnym (GOBEL i współaut. 2001; NACCACHE i DEHAENE 2001; DEHAENE i współaut. 2003, 2004; EGER i współaut. 2003; FIAS i współaut. 2003; PIAZZA i współaut. 2004; PINEL i współaut. 2004; NIEDER

2005; SATO i współaut. 2007; ANDRES i współaut. 2008; BROZZOLI i współaut. 2008; DOMAHS i współaut. 2008, 2010; KAUFMANN i współaut. 2008). Rzadziej wskazuje się na obszary zlokalizowane w lewym płacie czołowym, zwłaszcza w okolicach ośrodka Broki (SCHMITHORST i BROWN 2004, SHUMAN i KANWISHER 2004, MAJERUS i współaut. 2009, ASHWELL i RESTAK 2012, KLICHOWSKI i KRÓLICZAK 2017).

W ostatnich latach kilka raportów z badań prowadzonych z wykorzystaniem metody magnetoencefalografii (MEG), czyli techniki obrazowania elektrycznej czynności mózgu za pomocą rejestracji jej pola magnetycznego (PINHEIRO-CHAGAS i współaut. 2019), oraz elektrokortykografii (ECoG), a więc procedury, w której elektrody służące do pomiaru elektrycznej czynności mózgu umieszczane są bezpośrednio na korze mózgu podczas operacji chirurgicznych wymagających trepanacji czaszki (DAITCH i współaut. 2016, HERMES i współaut. 2017), dość znacznie skomplikowało ten obraz. Pokazały one bowiem, że kluczowymi dla obliczeń arytmetycznych mogą być mechanizmy poznawcze z obszarów mózgu znajdujących się w brzusznej części kory skroniowej, szczególnie w tylnej części zakrętu skroniowego dolnego, prawej lub lewej półkuli. W badaniach tych wykazano, że w tylnej części zakrętu skroniowego dolnego aktywność neuronalna wzrasta

Słowa kluczowe: przezczaszkowa stymulacja magnetyczna mózgu, liczenie, mapowanie mózgu, edukacja matematyczna

*Podczas przygotowania manuskryptu MK otrzymywał Stypendium dla Wybitnych Młodych Naukowców ufundowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (stypendium nr 0049/E-336/STYP/11/2016) oraz był koordynatorem grantu European Cooperation in Science and Technology: *European Network on Brain Malformations (Neuro-MIG)* (grant nr CA COST Action CA16118). COST jest częścią EU Framework Programme for Research and Innovation Horizon 2020. Sprzęt użyty w badaniu został sfinansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach grantu przyznanego GK (grant nr 6168/1A/128/2012).

Ryc. 1. Struktura działania matematycznego.

Liczba przed symbolem matematycznym (+) to operand 1: przetwarzając ją nie wykonujemy żadnej operacji arytmetycznej. Liczba po tym symbolu to operand 2: przetwarzając ją dokonujemy operacji polegającej np. na dodaniu jej do przetrzymywanego w pamięci operandu 1. W trakcie trwania tej operacji wzrasta aktywność neuronalna w tylnej części zakrętu skroniowego dolnego prawej lub lewej półkuli. Żółta linia poglądowo obrazuje aktywność tylnej części prawego zakrętu skroniowego dolnego (oznaczonego na standardowym mózgu żółtą kropką) podczas przetwarzania działania matematycznego. Niebieska linia natomiast obrazuje schematycznie aktywność tylnej części lewego zakrętu skroniowego dolnego (oznaczonego niebieską kropką) również podczas przetwarzania działania matematycznego.

wtedy, gdy osoba badana przetwarza drugi operand działania matematycznego, a zatem liczbę znajdującą się po symbolu operacji matematycznej (Ryc. 1).

Potencjalną funkcję tej aktywności określają jednocześnie obserwacje, że u tych samych osób przetwarzających liczbę będącą operandem pierwszym, lub bodźcem niematematycznym, nie obserwowano wzrostu aktywności w tylnej części zakrętu skroniowego dolnego (Ryc. 1). Postawiono zatem tezę, że zaobserwowana zmiana sygnału monitorowanego w tym obszarze nie jest powiązana z przetwarzaniem samej liczby, ale z dokonywaniem na niej jakiejś operacji arytmetycznej. Wydaje się więc, że obszary czołowe i ciemieniowe muszą współpracować z ośrodkami skroniowymi podczas liczenia (HANNAGAN i współaut. 2015, ARSALIDOU i współaut. 2018). Taki rodzaj współpracy ukazuje w schematycznej formie Ryc. 2.

Co ważniejsze, niektórzy badacze poznania matematycznego (YEO i współaut. 2017, PINHEIRO-CHAGAS i współaut. 2018) sformułowali nawet hipotezę, iż brzuszna kora skroniowa pełni przyczynową rolę w obliczeniach arytmetycznych – jest więc swoistym mózgowym ośrodkiem matematycznym.

Jednak badania z wykorzystaniem MEG, ECoG, a także innych metod neuroobrazowania, takich jak elektroencefalografia (EEG; nieinwazyjna metoda pomiaru elektrycznej czynności mózgu, w której elektrody umieszcza się na skórze głowy), czy nawet funkcjonalne obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego (fMRI), nie pozwalają na testowanie przyczynowej roli żadnych obszarów mózgu (FRIEDRICH i FRIEDERICI 2013, RAŚ i współaut. 2019). Pozwalają one tylko na

określenie, czy danemu zadaniu towarzyszy zmiana aktywności mózgu, która niekoniecznie musi być wywołana analizowanym procesem, np. liczeniem. Może ją bowiem wywoływać inny proces, np. przetrzymywanie operandu 1 w pamięci. O przyczynowej roli jakiegoś obszaru mózgu można jednak stosunkowo łatwo wnioskować (przynajmniej w kategoriach technik nieinwazyjnych) wykorzystując metodę przeczaszkowej stymulacji magnetycznej (TMS) (MONTEFINESE i współaut. 2017). W technice tej, przy pomocy szybko zmieniającego się pola magnetycznego, wywołać można bowiem hiperpolaryzację neuronów w określonym obszarze mózgu, a więc doprowadzić do krótkotrwałego (tj. trwającego około kilkudziesięciu milisekund) zakłócenia zdolności komórek nerwowych

Ryc. 2. Neuronalna sieć liczenia.

(A) W prawej półkuli mózgu w proces liczenia zaangażowana jest głównie bruzda śródcieniowa (IPS) współpracująca z zakrętem skroniowym dolnym (ITG). (B) W lewej półkuli sieć ta jest bardziej rozbudowana: tworzą ją także inne obszary płata ciemieniowego, takie jak zakręt kątowy (AG) i zakręt nadbrzeżny (SMG), a także obszary zlokalizowane w płacie czołowym, zwłaszcza w okolicach ośrodka Broki (BA45 i BA44).

Ryc. 3. Supermarketowa aranżacja laboratorium.

(A) Sprzęt do stymulacji i nawigacji oraz akcesoria sklepowe. (B) Pad do udzielania odpowiedzi oraz sposób ustawienia cewki (cewkę wskazuje czerwona strzałka). (C) Przykłady wykorzystanych etykiet sklepowych. (D) Przykładowe paragony.

do generacji i przewodzenia impulsów czynnościowych. Efekt ten nazywa się niekiedy „wirtualną leżą”. Technika TMS umożliwia bowiem sprawdzenie, czy chwilowe „wyłączenie” wybranego obszaru mózgu doprowadza do, szybko przemijającej, niezdolności osoby badanej do wykonania jakiegoś zadania (SALLAS i współaut. 2012, MAURER i współaut. 2015). Niestety, bardzo trudne jest takie ustawienie cewki służącej do stymulacji, by skutecznie oddziaływać na obszary znajdujące się w brzusznej części kory skroniowej (HAUCK i współaut. 2015). Tylko dwa znane nam raporty (POREISZ i współaut. 2009, GROTHEER i współaut. 2016) prezentują wyniki udanych eksperymentów, podczas których stymulowano te obszary. Tym niemniej, w żadnym z nich nie były to tylne części zakrętu skroniowego dolnego, prawej lub lewej półkuli. Wielkim wyzwaniem było zatem zweryfikowanie powyższej hipotezy, tj. określenie, czy tylne części zakrętu skroniowego dolnego rzeczywiście pełnią przyczynową rolę w obliczeniach arytmetycznych, czy może są tylko częścią neuronalnej sieci liczenia.

W artykule tym prezentujemy rezultaty eksperymentu, w którym udało się w pewnym stopniu dokonać takiej analizy. Stymulowaliśmy w nim tylną część zakrętu skroniowego dolnego, podczas gdy badani dokonywali powszednich obliczeń arytmetycznych. Nasze wyniki potwierdzają, iż obszary te są istotną częścią skomplikowanej sieci służącej do liczenia, jednak, przynajmniej w zakresie przetestowanego interwału czasowego i wykorzystanych operacji matematycznych, nie udało nam się wskazać na konkretny mechanizm, w jakim przyczynowa rola tych obszarów w procesie liczenia miałyby się przejawiać. Tym samym, nie możemy jednoznacznie stwierdzić, że stanowią one poszukiwany od lat ośrodek matematyczny w mózgu.

PRZECZASZKOWA STYMULACJA MAGNETYCZNA MÓZGU KLIENTÓW SUPERMARKETU

Nasze badanie uzyskało pozytywną opinię lokalnej komisji etyki ds. badań naukowych

z udziałem ludzi (opinia nr 9/10/01/2018) i zostało przeprowadzone zgodnie z zasadami Deklaracji Helsińskiej z 2013 r. wraz z jej najnowszymi zmianami. Udział wzięło w nim piętnastu zdrowych ochotników (12 kobiet) w wieku między 19 a 22 lata (średnia = 20 lat). Ich zadanie polegało na wykonywaniu dwuoperandowych, powszednich operacji na liczbach. Były to dwa typy operacji charakterystycznych dla zakupów w sklepie. Co ważne, na potrzeby tego badania zaaranżowaliśmy przestrzeń laboratorium w taki sposób, by przypominało ono sklep, co ukazuje panel A na Ryc. 3. Jak w trakcie zakupów, kiedy na bieżąco podliczamy kumulujący się wydatek, uczestnicy dodawali dwie ceny znajdujące się na etykietach sklepowych (przykładowe etykiety użyte w badaniu ukazane są na panelu C, Ryc. 3), lub w innym bloku testowym, zapamiętywali ceny z etykiet i sprawdzali, czy cena na paragonie jest taka sama (przykładowe parago-

ny użyte w badaniu ukazane są na panelu D, Ryc. 3). Pierwsze zadanie było więc zadaniem wymagającym liczenia (do zapamiętanego operandu 1 należało dodać operand 2), natomiast drugie, mające bardzo podobną strukturę, wymuszało tylko zapamiętanie operandu 1 i porównanie go z operandem 2 (bez liczenia czegokolwiek).

Badani wykonywali zadania w sześciu blokach. Każdy blok składał się z 20 prób, których strukturę w obu zadaniach pokazuje Ryc. 4. Kolejność bloków i prób w blokach była pseudozrandomizowana dla różnych uczestników. W każdym bloku było 15 prób ze stymulacją TMS i 5 prób kontrolnych, tj. bez stymulacji. Stymulacja rozpoczynała się zawsze po 106 milisekundach od wyświetlenia się operandu 2 i składała się z trzech pulsów o stałej wartości, tj. 65% mocy stymulatora (maksymalne napięcie, które można wytworzyć w systemie wynosi 1,67 kV, co daje pole magnetyczne o

Ryc. 4. Struktura próby.

(A) W zadaniu polegającym na dodawaniu dwóch cen z etykiet, każda próba rozpoczynała się wyświetleniem przez jedną sekundę punktu fiksacji w postaci krzyżyka wpisanego w koło. Następnie przez półtorej sekundy wyświetlała się cena, która potem była maskowana. Po trwającym niespełna pół sekundy interwale wyświetlała się druga etykieta. W próbach ze stymulacją pierwszy puls pojawiał się po stu sześciu milisekundach (106 ms) ekspozycji tego bodźca. Po głosowej reakcji badanego lub po pięciu sekundach w przypadku jej braku, bodziec zniknął i rozpoczynała się, po stosownym interwale przygotowawczym, kolejna próba. (B) W zadaniu polegającym na porównywaniu zapamiętanej ceny (etykiety) z ceną na paragonie, każda próba rozpoczynała się wyświetleniem przez jedną sekundę punktu fiksacji w postaci krzyżyka wpisanego w koło. Następnie przez półtorej sekundy wyświetlała się cena, która potem była maskowana. Po trwającym niespełna pół sekundy interwale wyświetlał się paragon. W próbach ze stymulacją pierwszy puls pojawiał się po stu sześciu milisekundach ekspozycji tego bodźca. Po wciśnięciu przez badanego przycisku lub po pięciu sekundach w przypadku braku reakcji, bodziec zniknął i rozpoczynała się, po stosownym interwale przygotowawczym, kolejna próba.

sile do 1 tesli). Częstotliwość stymulacji wynosiła 10 Hz, tzn. drugi puls występował w 206 ms, a trzeci w 306 ms od pojawienia się bodźca. Wybór takiego interwału czasowego jest nieprzypadkowy, gdyż takie okno stymulacji (okres od pierwszego do ostatniego pulsu, a zatem od 106 do 306 ms) dokładnie odzwierciedla okres modulacji sygnału, tj. wzrostu do wartości szczytowej i spadku do wartości wyjściowej aktywności tylnej części zakrętu skroniowego dolnego w badaniu MEG przeprowadzonym przez PINHEIRO-CHAGAS i współaut. (2019) (por. dolny przebieg na Ryc. 1). Moc stymulacji (65% mocy stymulatora) została wyznaczona na bazie protokołów innych badań, w których wykorzystywano stymulatory o analogicznych parametrach (ROBERTSON i współaut. 2003, SALILLAS i współaut. 2012, MAURER i współaut. 2015, MONTEFINESE i współaut. 2017). Odstępy między stymulacjami wynosiły, zgodnie z zaleceniami dotyczącymi badań z wykorzystaniem tej metody (ROSSI i współaut. 2009), minimum 7 sekund (a ponieważ to eksperymentator inicjował kolejną próbę, zazwyczaj znacznie więcej), co niweluje ryzyko kumulowania się efektów stymulacji.

Bodźce wyświetlane były na 47-calowym ekranie telewizora LG (o przekątnej 119,38 cm), umieszczonym w odległości 228 cm od fotela (na którym siedział uczestnik), z wykorzystaniem programu SuperLab 4.5 (Cedrus) i komputera Dell. Komputer był zsynchronizowany ze stymulatorem Magstim Rapid 2 Plus 1 poprzez kartę National Instruments PCI-DIO24 Digital I/O. Użyliśmy cewki w kształcie ósemki o średnicy wewnętrznej 70 mm. Stymulator i cewka są widoczne na panelu A, Ryc. 3. W zadaniu polegającym na dodawaniu cen, badani podawali odpowiedź na głos, a czas ich reakcji (okres od wyświetlenia się bodźca do początku wypowiedzi) rejestrował SV-1 Smart Voice Key (Cedrus). Poprawność odpowiedzi zapisywał badający. W zadaniu drugim, badany odpowiadał przez przyciśnięcie odpowiednich przycisków na padzie RB-730 (Cedrus): gdy cena na rachunku była taka sama, jak cena na etykiecie, powinien przycisnąć dwa zielone klawisze (jeden ręką prawą, drugi lewą), gdy rachunek się nie zgadzał, dwa czerwone. Podczas badania uczestnik miał cały czas palce umieszczone na padzie, a czas reakcji liczony był od wyświetlenia się bodźca do wciśnięcia przycisku.

Punkty stymulacji wyznaczono w taki sposób, by, uwzględniając ograniczenia przestrzenne wzajemnego ułożenia cewki TMS i głowy badanego, możliwe było ich stymulowanie. Jak pokazuje Ryc. 5, stymulowaliśmy maksymalnie wysunięty do tyłu i góry obszar zakrętu skroniowego dolnego. Dzięki

Ryc. 5. Punkty stymulacji.

(A) Tylne części lewego i prawego zakrętu skroniowego dolnego – widok w płaszczyźnie czołowej. (B) Tylne części lewego i prawego zakrętu skroniowego dolnego – widok w płaszczyźnie poprzecznej. (C-F) Punkty stymulacji oznaczone na modelu standardowego mózgu. (C) Widok od prawego boku. (D) Widok od lewego boku. (E) Widok od dołu. (F). Widok od tyłu. Pomarańczowa kropka – szczyt głowy. Żółta kropka – tylna część prawego zakrętu skroniowego dolnego (koordynaty MNI: $x=47,59$, $y=-64,59$, $z=-18,52$). Niebieska kropka – tylna część lewego zakrętu skroniowego dolnego (koordynaty MNI: $x=-47,59$, $y=-64,59$, $z=-18,52$). Stymulacja oddziałuje na pole o promieniu 2,5 mm od wyznaczonego punktu (patrz MOISA i współaut. 2009, GOMEZ-TAMES i współaut. 2018), co zostało poglądowo zobrazowane na rysunku poświata otaczającą punkty stymulacji.

temu zabiegowi możliwe było umieszczenie cewki tak, by nie kolidowała z uchem badanego oraz uzyskanie odpowiedniego kąta pomiędzy cewką a głową, przy jednoczesnej prawidłowej jej orientacji (por. panel A i B, Ryc. 3). Jako punkt kontrolny przyjęliśmy szczyt głowy (Vertex). Tym samym, badany wykonywał każde z zadań w bloku ze stymulacją skierowaną do tylnej części lewego zakrętu skroniowego dolnego, tylnej części prawego zakrętu skroniowego dolnego oraz szczytu głowy.

Do zlokalizowania punktów stymulacji i do precyzyjnego ich stymulowania (z dokładnością do 0,1 mm) wykorzystano kompaty-

Ryc. 6. Wyniki eksperymentu na poziomie grupy.

Uczestnicy wykonywali zadanie polegające na dodawaniu dwóch cen z etykiet istotnie wolniej, niż to związane z porównywaniem zapamiętanej ceny z etykiety z ceną na paragonie. W obu zadaniach – przynajmniej w analizie na poziomie grupy – stymulacja nie wywołała żadnego istotnego opóźnienia w czasach reakcji badanych. Gwiazdki (***) oznaczają $p < 0,001$. Słupki błędów ukazują standardowe błędy średniej.

bilną z używanym stymulatorem neuronawigację Brainsight (Rogue Research), wraz z oprogramowaniem Brainsight 2.3.9 i szablonem standardowego mózgu MNI ICBM 152 (więcej informacji na temat procedury skalowania mózgu badanych do standardowego mózgu przy pomocy tego zestawu badawczego: Klichowski i Króliczak 2020). Zebrane dane przeanalizowano z wykorzystaniem programu SPSS 24 (IBM). Zmiennymi zależnymi były czasy reakcji badanych. Do ich porównania zastosowaliśmy wieloczynnikową analizę wariancji dla powtarzanych pomiarów (rmANOVA) z następującymi czynnikami wewnątrzobiektoowymi: typ zadania ([1] dodawanie cen z etykiet i [2] porównywanie ceny z etykiety z ceną na rachunku) i obszar stymulacji ([1] tylna część lewego zakrętu skroniowego dolnego, [2] tylna część prawego zakrętu skroniowego dolnego, [3] szczyt głowy oraz [4] brak stymulacji). Przyjęty poziom istotności wynosił $\alpha = 0,05$. Istotnie dłuższe czasy reakcji przy stymulacji tylnej części zakrętu skroniowego dolnego w porównaniu do stymulacji szczytu głowy lub braku stymulacji, wskazywałyby, iż obszar ten pełni krytyczną rolę w wykonaniu danego zdania. Dokładniej, jeśli czas reakcji byłby dłuższy, oznaczałoby to, że wywołanie wirtualnej lezji

w tym obszarze uniemożliwia wykonanie zadania przez okres jej trwania.

CZY DODAJEMY TYLNA CZĘŚCIĄ ZAKRĘTU SKRONIOWEGO DOLNEGO?

Rycina 6 pokazuje, że badani wykonywali zadanie polegające na dodawaniu dwóch cen z etykiet istotnie wolniej, niż to związane z porównywaniem zapamiętanej ceny z etykiety z ceną na paragonie (średnia różnica = 1292 ms, $F_{(1, 14)} = 112,81$, $p < 0,001$). Wynik ten nie zaskakuje, bowiem dodawanie cen było znacznie trudniejsze, wymagało dokonywania obliczeń, co wydłuża czas reakcji.

W obu zadaniach, na poziomie analizy grupowej, stymulacja nie wywołała istotnego opóźnienia w czasach reakcji osób badanych (wszystkie $p > 0,05$). Bez względu na to, czy uczestnicy wykonywali zadanie bez stymulacji, ze stymulacją szczytu głowy, czy ze stymulacją tylnej części lewego lub prawego zakrętu skroniowego dolnego, średnia szybkość udzielania odpowiedzi nie różniła się istotnie. Rycina 7 A i B pokazuje jednak, że analizując reakcje poszczególnych badanych w zadaniu związanym z dodawaniem cen zauważyć można, że u większości uczestników stymulacja wywoływała wyraźne zmiany

Ryc. 7. Wyniki eksperymentu zilustrowane z poziomu uczestników.

(A) Dodawanie dwóch cen z etykiet: Stymulacja tylnej część zakrętu skroniowego dolnego vs. brak stymulacji. (B) Dodawanie dwóch cen z etykiet: Stymulacja tylnej część zakrętu skroniowego dolnego vs. stymulacja szczytu głowy. Zarówno w (A) i (B) widać, że stymulacja modulowała czasy reakcji osób badanych. (C) Porównywanie zapamiętanej ceny z etykiety z ceną na paragonie: Stymulacja tylnej część zakrętu skroniowego dolnego vs. brak stymulacji. (D) Porównywanie zapamiętanej ceny z etykiety z ceną na paragonie: Stymulacja tylnej część zakrętu skroniowego dolnego vs. stymulacja szczytu głowy. Zarówno w (C) i (D) stymulacja nie modulowała czasów reakcji u większości osób badanych.

w czasach reakcji – niekiedy opóźniała ich odpowiedzi, a czasem je przyspieszała.

Choć wyniki naszego eksperymentu na poziomie grupy nie pokazują, że tylna część zakrętu skroniowego dolnego pełni przyczynową rolę w liczeniu (patrz DE GRAAF i SACK 2011), to analiza wyników pojedynczych uczestników sugeruje inną interpretację. Mianowicie, stymulacja tego obszaru czasami spowalniała, a czasami przyspieszała proces dodawania u poszczególnych osób badanych. Podczas gdy spowolnienie czasów reakcji można interpretować jako oczekiwaną demonstrację krytycznej roli, to przyspie-

szanie reakcji u innych uczestników sugeruje już inną rolę tylnej część zakrętu skroniowego dolnego w umysłowej arytmetyce. Rycina 8 pokazuje bezwzględne wartości różnic w czasach reakcji uczestników badania w obu zadaniach. Widać wyraźnie, że tylko w zadaniu polegającym na dodawaniu cen stymulacja naprawdę modulowała aktywność mózgu (por. Ryc. 7A, B).

Nie ulega zatem wątpliwości, że obserwowane we wcześniejszych badaniach (DAITCH i współaut. 2016, HERMES i współaut. 2017, PINHEIRO-CHAGAS i współaut. 2019) aktywacje w okolicach tylnej części zakrętu skroniowe-

Ryc. 8. Bezwzględne wartości średnich różnic w czasach reakcji uczestników eksperymentu.

Analiza wartości bezwzględnych pokazuje, że stymulacja rzeczywiście wywoływała zmiany w szybkości udzielania odpowiedzi podczas dodawania, średnio o 156 ms (min. 2 ms, max 780 ms). Potwierdza to test t względem 0 (wszystkie $p < 0,001$). Dodatkowa $rmANOVA$ na skonstruowanych wartościach bezwzględnych pokazała jednak efekt główny stymulacji dla typu zadania ($F_{(1,14)} = 23,36, p < 0,001$), gdzie modulacja czasów reakcji porównywanych zarówno z próbami bez stymulacji, jak i stymulacją szczytu głowy prowadziła do większych zmian w przypadku dodawania (średnia różnica pomiędzy zadaniami = 180 ms). Gwiazdki (***) oznaczają $p < 0,001$. Słupki błędów ukazują błędy standardowe średniej.

go dolnego w czasie przetwarzania operandu 2 sugerują, że obszar ten jest prawdopodobnie elementem dużej i skomplikowanej sieci neuronalnej konstytuującej proces umysłowych obliczeń matematycznych. Tylna część zakrętu skroniowego dolnego może ponadto pośredniczyć we wzrokowym przetwarzaniu kształtu cyfr lub mieć związek z późniejszym relacjonowaniem odpowiedzi w formie językowej (SZWED i współaut. 2011, HANNAGAN i współaut. 2015, por. CASTALDI i współaut. 2019). Na przykład, szybsze reakcje niektórych badanych można tłumaczyć tym, iż przezczaszkowa stymulacja magnetyczna wywołała depolaryzację (pobudzenie) neuronów w tych okolicach i przygotowała ten obszar wraz innymi elementami sieci na scalenie odpowiedzi (POTOK i współaut. 2019).

PODSUMOWANIE: KU NEURONAUCIE CODZIENNOŚCI

Metoda przezczaszkowej stymulacji magnetycznej mózgu pozwala na badanie przyczynowej roli wybranych obszarów mózgu człowieka dla danego zadania. Jest to więc niezwykle ważne uzupełnienie popularnych metod neuroobrazowania, takich jak magnetoencefalografia, elektroencefalografia czy funkcjonalne obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego, bowiem strategie te po-

zwalają wyłącznie na ukazanie powiązania danych procesów z pewnymi układami aktywności mózgu. Dzięki przezczaszkowej stymulacji mózgu możemy sprawdzić wagę tych aktywacji i lepiej zrozumieć rolę wybranych ośrodków w danych zadaniach (DE GRAAF i SACK 2011).

Nasz eksperyment pokazuje, że naukowcy interpretujący wyniki wcześniejszych badań, w których zastosowano metody obrazowania aktywności mózgu (HANNAGAN i współaut. 2015; DAITCH i współaut. 2016; HERMES i współaut. 2017; PINHEIRO-CHAGAS i współaut. 2018, 2019), mogli przecenić wagę wzrostu aktywności neuronalnej w tylnych częściach zakrętów skroniowych dolnych, zaobserwowanego podczas dokonywania przez badanych operacji arytmetycznych. Nasze wyniki sugerują, że bez precyzyjnej wiedzy o mentalnych przebiegach czasowych operacji arytmetycznych nie da się określić dokładnej roli badanego obszaru w liczeniu. Może on zatem być zarówno poszukiwanym ośrodkiem matematyki, jak i pełnić ważne role wspierające proces liczenia. W drugim przypadku, obszar ten może być istotną jednostką biorącą udział w procesach związanych z matematyką, ale tylko wtedy, gdy zaczynają do niego służyć informacje zwrotne z innych elementów sieci, które są bardziej wyspecjalizowane w przeprowadzaniu składowych operacji matematycznych. Jego rola

„zarządcza” sprowadzałyby się wówczas do porównania wcześniej oczekiwanego wyniku z rezultatem raportowanym przez całą sieć funkcjonalną i przesłaniem go do ośrodka komunikującego wynik przeprowadzonej operacji (w sposób werbalny, bądź nie). Wówczas, zakłócenie tego procesu wymagałoby nieco późniejszej stymulacji niż ta, jaką wykorzystaliśmy w tym raporcie (np. rozpoczynającej się w 206 ms ekspozycji operandu 2, kiedy domniemywanym obliczeniom towarzyszy szczyt aktywności badanego obszaru).

Oczywiście potrzebne są dalsze badania, w których wyeliminuje się inne potencjalne ograniczenia naszego eksperymentu. Po pierwsze, należałoby zbadać większą próbę osób (co najmniej 40). Po drugie, nowe badanie powinno się tak zaprojektować, by móc wykluczyć możliwość preferencyjnego wykorzystywania tylko jednej półkuli do obliczeń matematycznych, u niektórych lewej, a u innych prawej, co prowadzi do uśrednienia tego efektu na poziomie grupy. Nawet w przypadku specjalizacji tego obszaru tylko w przygotowaniu raportów słownych, spodziewalibyśmy się przewagi lewej półkuli. Nasze wyniki tymczasem pokazują, że nie ma to miejsca przynajmniej na wczesnych etapach przetwarzania (w badanym przez nas oknie czasowym). Po trzecie, w dalszych badaniach trzeba wykorzystać też inne bodźce, niezwiązane z zakupami w sklepie. Po czwarte wreszcie, warto byłoby połączyć metodę przezczaszkowej stymulacji magnetycznej mózgu z techniką elektroencefalografii. Dzięki temu, można by monitorować to, czy stymulacji nie towarzyszy wzrost (związany z depolaryzacją neuronów), zamiast spadku (wywołanego hiperpolaryzacją neuronów), aktywności stymulowanego ośrodka, co w naszym eksperymencie nie było możliwe (CHANG i współaut. 2019, SALO i współaut. 2020).

Opisywany tu projekt jest kolejnym badaniem prowadzonym w naszym laboratorium, w którym symulowaliśmy naturalne, powszednie, codzienne warunki. Warto to odnotować, bowiem eksperymenty prowadzone w ramach paradygmatów neuronauki są bardzo często obciążone niską trafnością ekologiczną. Tymczasem, jak pokazało kilka ostatnich badań, pozbawianie eksperymentów naturalnego kontekstu, często doprowadza do badania innych niż zamierzono procesów, nieraz charakterystycznych tylko dla sztucznych warunków eksperymentalnych. Na przykład, w badaniu przeprowadzonym przez D'MELLO (2013) porównano efekty uczenia się jednakową metodą w klasie szkolnej i w laboratorium. Okazało się, że wyniki obu testów były znacząco różne (te uzyskane w laboratorium były istotnie niż-

sze). W badaniu BLANCO-ELORRIETA i PYLKANEN (2017) porównano aktywność mózgu osób dwujęzycznych podczas rozmów zbliżonych do tych, jakie prowadzi się w codziennym życiu, oraz podczas takich, jakie prowadzono we wcześniejszych eksperymentach. Tu także uzyskano odmienne wyniki dla obu warunków (neuralna sieć reprezentująca codzienny język osób dwujęzycznych była istotnie inna, od tej związanej z dialogami narzuconymi procedurą eksperymentalną). Wiele współcześnie prowadzonych eksperymentów (np. WERNER i współaut. 2018) sugeruje, że nawet metodologicznie doskonałe zaprojektowane badania laboratoryjne mogą mieć tak niską trafność ekologiczną, że mogą nie odnosić się do procesów związanych z realnym życiem. Oczywiście nie oznacza to, że postulujemy rezygnację z badań laboratoryjnych.

W jednym z naszych ostatnich badań (KLICHOWSKI 2017) porównaliśmy rezultaty dwóch zadań pamięciowych (zadanie Sternberga i zadanie dwa-wstecz) wykonywanych podczas spaceru w parku, z wynikami tych zadań realizowanych podczas spaceru w laboratorium, na specjalnie wykonanym symulatorze chodu. Rejestrowane przez nas efekty behawioralne nie różniły się w obu warunkach. Również inne nasze eksperymenty (KLICHOWSKI i KRÓLICZAK 2017, PRZYBYŁA i KLICHOWSKI 2018, WITKOWSKI i współaut. 2018, NOWIK i współaut. 2019, STYRKOWIEC i współaut. 2019, Klichowski i Króliczak 2020) pokazują, że wysoka trafność ekologiczna badań neuronaukowych może być osiągana nie tylko w warunkach, które są ściśle naturalne dla danego procesu, ale także poprzez symulowanie naturalnych sytuacji (zarówno w kontekście przygotowywania bodźców, jak i aranżacji przestrzeni) w laboratorium. Ponadto, jak pokazują nasze doświadczenia, eksperymenty wykonywane w naturalnych warunkach stają się fantastyczną przygodą zarówno dla badaczy, jak i badanych.

Streszczenie

Zarówno badania neuropsychologiczne na pacjentach, jak i tradycyjne raporty neuroobrazowe od osób zdrowych, pokazują, że kluczowe dla umysłowych obliczeń arytmetycznych obszary mózgu znajdują się w płatach ciemieniowych oraz, co kontrowersyjne, w lewym płacie czołowym. W ostatnich latach kilka publikacji opartych na metodzie magnetoencefalografii oraz elektroenkografii pokazało ponadto, że obszary krytyczne dla operacji arytmetycznych mogą znajdować się w tylnej części zakrętu skroniowego dolnego prawej lub lewej półkuli. Niektórzy badacze zaczęli je nawet nazywać mózgowymi „ośrodkami matematyki”. Eksperymenty prowadzone z wykorzystaniem wymienionych metod nie pozwalają jednak na testowanie roli pełnionej przez te obszary mózgu w liczeniu. Udział tych obszarów w procesie liczenia można sprawdzić wykorzystując przezczaszkową

stymulację magnetyczną. W metodzie tej trudno jest jednak tak ustawić cewkę do stymulacji, by oddziaływać na kluczowe obszary znajdujące się w brzusznej korze skroniowej. W artykule prezentujemy rezultaty eksperymentu, w którym udało się tego dokonać. Stymulowaliśmy tylny prawy i lewy zakręt skroniowy dolny, podczas gdy badani dokonywali powszednich obliczeń arytmetycznych. Stymulacje te modulowały czasy reakcji osób badanych, choć w różnych kierunkach – zwalniając je lub przyspieszając. Zatem, pomimo, że nasze wyniki nie rozstrzygają, czy okolice te pełnią przyczynową rolę w procesie dodawania, np. czy stanowią one poszukiwany od lat ośrodek matematyki, pokazują jednak, że grają one istotną rolę w przetwarzaniu operacji matematycznych.

LITERATURA

- ANDRES M., OLIVIER E., BADETS A., 2008. *Actions, words, and number a motor contribution to semantic processing?* Curr. Direct. Psychol. Sci. 17, 313-317.
- ARSALIDOU M., PAWLIW-LEVAC M., SADEGHI M., PASCUAL-LEONE J., 2018. *Brain areas associated with numbers and calculations in children: Meta-analyses of fMRI studies.* Develop. Cognit. Neurosci. 30, 239-250.
- ASHWELL K., RESTAK R., 2012. *The brain book: Development, function, disorder, health,* Firefly Books, New York-Ontario.
- BLANCO-ELORRIETA E., PYLKKANEN L., 2017. *Bilingual language switching in the laboratory versus in the wild: The spatiotemporal dynamics of adaptive language control.* J. Neurosci. 37, 9022-9036.
- BROZZOLI C., ISHIHARA M., GOBEL S. M., SALEMME R., ROSSETTI Y., FARNE A., 2008. *Touch perception reveals the dominance of spatial over digital representation of numbers.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA 105, 5644-5648.
- CASTALDI E., PIAZZA M., DEHAENE S., VIGNAUD A., EGER E., 2019. *Attentional amplification of neural codes for number independent of other quantities along the dorsal visual stream.* eLife 8, e45160.
- CHANG J. Y., FECCHIO M., PIGORINI A., MASSIMINI M., TONONI G., VAN VEEN B. D., 2019. *Assessing recurrent interactions in cortical networks: Modeling EEG response to transcranial magnetic stimulation.* J. Neurosci. Meth. 312, 93-104.
- D'MELLO S., 2013. *A selective meta-analysis on the relative incidence of discrete affective states during learning with technology.* J. Educ. Psychol. 105, 1082-1099.
- DAITCH A. L., FOSTER B. L., SCHROUFF J., RANGARAJAN V., KASIKCI I., GATTAS S., PARVIZI J., 2016. *Mapping human temporal and parietal neuronal population activity and functional coupling during mathematical cognition.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA 113, E7277-E7286.
- DE GRAAF T. A., SACK A. T., 2011. *Null results in TMS: From absence of evidence to evidence of absence.* Neurosci. Biobehav. Rev. 35, 871-877.
- DEHAENE S., PIAZZA M., PINEL P., COHEN L., 2003. *Three parietal circuits for number processing.* Cognit. Neuropsychol. 20, 487-506.
- DEHAENE S., MOLKO N., COHEN L., WILSON A. J., 2004. *Arithmetic and the brain.* Curr. Opin. Neurobiol. 14, 218-224.
- DOMAHS F., KRINZINGER H., WILLMES K., 2008. *Mind the gap between both hands: Evidence for internal finger-based number representations in children's mental calculation.* Cortex 44, 359-367.
- DOMAHS F., MOELLER K., HUBER S., WILLMES K., NUERK H.-C., 2010. *Embodied numerosity: Implicit hand-based representations influence symbolic number processing across cultures.* Cognition 116, 251-266.
- EGER E., STERZER P., RUSS M. O., GIRAUD A. L., KLEINSCHMIDT A., 2003. *A supramodal number representation in human intraparietal cortex.* Neuron 37, 719-725.
- FIAS W., LAMMERTYN J., REYNVOET B., DUPONT P., ORBAN G. A., 2003. *Parietal representation of symbolic and nonsymbolic magnitude.* J. Cognit. Neurosci. 15, 47-56.
- FRIEDRICH R. M., FRIEDERICI A. D., 2013. *Mathematical logic in the human brain: Semantics.* PLoS One 8, e53699.
- GOBEL S., WALSH V., RUSHWORTH M. F., 2001. *The mental number line and the human angular gyrus.* NeuroImage 14, 1278-1289.
- GOMEZ-TAMES J., HAMASAKA A., LAAKSO I., HIRATA A., UGAWA Y., 2018. *Atlas of optimal coil orientation and position for TMS: A computational study.* Brain Stimul. 11, 839-848.
- GROTHEER M., AMBRUS G. G., KOVACS G., 2016. *Causal evidence of the involvement of the number form area in the visual detection of numbers and letters.* NeuroImage 132, 314-319.
- HANNAGAN T., AMEDI A., COHEN L., DEHAENE-LAMBERTZ G., DEHAENE S., 2015. *Origins of the specialization for letters and numbers in ventral occipitotemporal cortex.* Trends Cognit. Sci. 19, 374-382.
- HAUCK T., TANIGAWA N., PROBST M., WOHLSCHLAGER A., ILLE S., SOLLMANN N., MAURER S., ZIMMER C., RINGEL F., MEYER B., KRIEG S. M., 2015. *Task type affects location of language-positive cortical regions by repetitive navigated transcranial magnetic stimulation mapping.* PLoS One 10, e0125298.
- HERMES D., RANGARAJAN V., FOSTER B. L., KING J. R., KASIKCI I., MILLER K. J., PARVIZI J., 2017. *Electrophysiological responses in the ventral temporal cortex during reading of numerals and calculation.* Cerebral Cortex 27, 567-575.
- HOUDE O., TZOURIO-MAZOYER N., 2003. *Neural foundations of logical and mathematical cognition.* Nat. Rev. Neurosci. 4, 507-514.
- KAUFMANN L., VOGEL S. E., WOOD G., KREMSEYER C., SCHOCKE M., ZIMMERHACKL L. B., KOTEN J. W., 2008. *A developmental fMRI study of nonsymbolic numerical and spatial processing.* Cortex 44, 376-385.
- KLICHOWSKI M., 2017. *Learning in CyberParks. A theoretical and empirical study.* Poznań: Adam Mickiewicz University Press.
- KLICHOWSKI M., KRÓLICZAK G., 2017. *Numbers and functional lateralization: A visual half-field and dichotic listening study in proficient bilinguals.* Neuropsychologia 100, 93-109.
- KLICHOWSKI M., KRÓLICZAK G., 2020. *Mental shopping calculations: A transcranial magnetic stimulation study.* (tekst w recenzji.)
- MAJERUS S., D'ARGEMBEAU A., MARTINEZ PEREZ T., BELAYACHI S., VAN DER LINDEN M., COLLETTE F., SALMON E., SEURINCK R., FIAS W., MAQUET P., 2009. *The commonality of neural networks for verbal and visual short-term memory.* J. Cognit. Neurosci. 22, 2570-2593.
- MAURER S., TANIGAWA N., SOLLMANN N., HAUCK T., ILLE S., BOECKH-BEHRENS T., MEYER B., KRIEG S. M., 2015. *Non-invasive mapping of calculation function by repetitive navigated tran-*

- scranial magnetic stimulation. *Brain Struct. Funct.* 221, 3927-3947.
- MOISA M., POHMANN R., EWALD L., THIELSCHER A., 2009. *New coil positioning method for interleaved transcranial magnetic stimulation (TMS)/functional MRI (fMRI) and its validation in a motor cortex study.* *J. Magnet. Reson. Imaging* 29, 189-197.
- MONTEFINESE M., TURCO C., PICCIONE F., SEMENZA C., 2017. *Causal role of the posterior parietal cortex for two-digit mental subtraction and addition: A repetitive TMS study.* *NeuroImage* 155, 72-81.
- NACCACHE L., DEHAENE S., 2001. *The priming method: Imaging unconscious repetition priming reveals an abstract representation of number in the parietal lobe.* *Cerebral Cortex* 11, 966-974.
- NIEDER A., 2005. *Counting on neurons: The neurobiology of numerical competence.* *Nat. Rev. Neurosci.* 6, 177-190.
- NOWIK A. M., STYRKOWIEC P. P., KRÓLICKAK G., 2019. *Manual "Grasparatus": A nifty tool for presenting real objects in fMRI research.* *MethodsX* 6, 1353-1359.
- PIAZZA M., IZARD V., PINEL P., LE BIHAN D., DEHAENE S., 2004. *Tuning curves for approximate numerosity in the human intraparietal sulcus.* *Neuron* 44, 547-555.
- PINEL P., PIAZZA M., LE BIHAN D., DEHAENE S., 2004. *Distributed and overlapping cerebral representations of number, size, and luminance during comparative judgments.* *Neuron* 41, 983-993.
- PINHEIRO-CHAGAS P., DAITCH A., PARVIZI J., DEHAENE S., 2018. *Brain mechanisms of arithmetic: A crucial role for ventral temporal cortex.* *J. Cognit. Neurosci.* 30, 1757-1772.
- PINHEIRO-CHAGAS P., PIAZZA M., DEHAENE S., 2019. *Decoding the processing stages of mental arithmetic with magnetoencephalography.* *Cortex* 114, 124-139.
- POREISZ C., PAULUS W., MOSER T., LANG N., 2009. *Does a single session of theta-burst transcranial magnetic stimulation of inferior temporal cortex affect tinnitus perception?* *BMC Neurosci.* 10, 54.
- POTOK W., MASKIEWICZ A., KRÓLICKAK G., MARANGON M., 2019. *The temporal involvement of the left supramarginal gyrus in planning functional grasps: A neuronavigated TMS study.* *Cortex* 111, 16-34.
- PRZYBYŁA T., KLICHOWSKI M., 2018. *Codzienne operacje arytmetyczne a problem kosztów podwójnego zadania: Raport z eksperymentu behawioralnego kontrolowanego elektroencefalografem.* *Studia Edukacyjne* 49, 145-157.
- RAS M., NOWIK A. M., KLAUTER A., KRÓLICKAK G., 2019. *When is the brain ready for mental actions? Readiness potential for mental calculations.* *Acta Neurobiol. Exp.* 79, 319-331.
- ROBERTSON E. M., THEORET H., PASCUAL-LEONE A., 2003. *Studies in cognition: The problems solved and created by transcranial magnetic stimulation.* *J. Cognit. Neurosci.* 15, 948-960.
- ROSSI S., HALLETT M., ROSSINI P. M., PASCUAL-LEONE A., 2009. *The Safety of TMS Consensus Group. Safety, ethical considerations, and application guidelines for the use of transcranial magnetic stimulation in clinical practice and research.* *Clin. Neurophysiol.* 120, 2008-2039.
- SALILLAS E., SEMENZA C., BASSO D., VECCHI T., SIEGAL M., 2012. *Single pulse TMS induced disruption to right and left parietal cortex on addition and multiplication.* *NeuroImage* 59, 3159-3165.
- SALO K. S. T., MUTANEN T. P., VAALTO S. M., ILMONEMI R. J., 2020. *EEG artifact removal in TMS studies of cortical speech areas.* *Brain Topogr.* 33, 1-9.
- SATO M., CATTANEO L., RIZZOLATTI G., GALLESE V., 2007. *Numbers within our hands: modulation of corticospinal excitability of hand muscles during numerical judgment.* *J. Cognit. Neurosci.* 19, 684-693.
- SCHMITHORST V. J., BROWN R. D., 2004. *Empirical validation of the Triple-Code Model of numerical processing for complex math operations using functional MRI and group independent component analysis of the mental addition and subtraction of fractions.* *NeuroImage* 22, 1414-1420.
- SHUMAN M., KANWISHER N., 2004. *Numerical magnitude in the human parietal lobe: Tests of representational generality and domain specificity.* *Neuron* 44, 557-569.
- STYRKOWIEC P. P., NOWIK A. M., KRÓLICKAK G., 2019. *The neural underpinnings of haptically guided functional grasping of tools: An fMRI study.* *NeuroImage* 194, 149-162.
- SZWED M., DEHAENE S., KLEINSCHMIDT A., EGER E., VALABREGUE R., AMADON A., COHEN L., 2011. *Specialization for written words over objects in the visual cortex.* *NeuroImage* 56, 330-344.
- WERNER B., VON RAMIN E., SPRUYT A., ROTHERMUND K., 2018. *Does sunshine prime loyal... or summer? Effects of associative relatedness on the evaluative priming effect in the valent/neutral categorisation task.* *Cogn. Emot.* 32, 222-230.
- WITKOWSKI M., BRONIKOWSKI M., NOWIK A., TOMCZAK M., STRUGAREK J., KRÓLICKAK G., 2018. *Evaluation of the effectiveness of a transfer (interhemispheric) training program in the early stages of fencing training.* *J. Sports Med. Phys. Fitness* 58, 1368-1374.
- YEO D. J., WILKEY E. D., PRICE G. R., 2017. *The search for the number form area: A functional neuroimaging meta-analysis.* *Neurosci. Biobehav. Rev.* 78, 145-160.

KOSMOS Vol. 69, 1, 145–156, 2020

MICHAŁ KLICHOWSKI¹, GRZEGORZ KRÓLICZAK²

¹*Faculty of Educational Studies,* ²*Faculty of Psychology and Cognitive Science, Adam Mickiewicz University, 89 Szamarzewskiego Str., 60-568 Poznań, E-mail: klich@amu.edu.pl*

A ROLE OF THE POSTERIOR INFERIOR TEMPORAL GYRUS IN EVERYDAY ARITHMETIC

Summary

Both neuropsychological studies in patients, and traditional neuroimaging reports in healthy individuals show that the key brain areas for mental calculations are located in the parietal lobes and, arguably, in the left frontal lobe. In recent years, several reports based on magnetoencephalography and electrocorticography have shown that the areas critical for arithmetic operations could be located in the posterior inferior temporal gyrus of the right or left hemisphere. Some researchers have even begun to call them the brain's "mathematic areas". However, the research performed with the used methods does not allow for testing the causal role of these brain areas in arithmetic calculations. While the causal role can be studied with transcranial magnetic stimulation, it is difficult to obtain such a position of the coil that would affect key areas located in the ventral temporal cortex. Nevertheless, we were successful in doing so. In this paper we present the results of an experiment in which we stimulated the posterior left and right inferior temporal gyrus while participants performed daily arithmetic. Although stimulations did modulate response times, they did it in different directions for individual participants – slowing down or speeding them up. Therefore, despite the fact that our results do not resolve whether or not these sites play a causal role in the adding process, e.g. if they are the mathematical areas that were sought for years, these outcomes show that the studied regions play a significant, even if somewhat different, function in processing mathematical operations.

Key words: transcranial magnetic stimulation of the brain, counting, brain mapping, mathematical education