

25. Rong, Y., Liu W., Wang J., Fan J., Luo Y., Li L., Kong F., Chen J., Tang P., Cai W. (2019b) Neural stem cell–derived small extracellular vesicles attenuate apoptosis and neuroinflammation after traumatic spinal cord injury by activating autophagy. *Cell Death Dis*, 10: 340.
26. Sarveazad, A., Babahajian A., Bakhtiari M., Soleimani M., Behnam B., Yari A., Akbari A., Yousefifard M., Janzadeh A., Amini N., Agah S., Fallah A., Joghataei M. T. (2017) The combined application of human adipose derived stem cells and Chondroitinase ABC in treatment of a spinal cord injury model. *Neuropeptides*, 61: 39–47.
27. Sharp, J., Frame J., Siegenthaler M., Nistor G., Keirstead H. S. (2010) Human embryonic stem cell–derived oligodendrocyte progenitor cell transplants improve recovery after cervical spinal cord injury. *Stem Cells*, 28: 152–163.
28. Silver, J., Miller J. H. (2004) Regeneration beyond the glial scar. *Nature Reviews Neuroscience*, 5: 146–156.
29. Sławińska, U., Majczyński H., Djavadian R. (2000) Recovery of hindlimb motor functions after spinal cord transection is enhanced by grafts of the embryonic raphe nuclei. *Exp Brain Res*, 132: 27–38.
30. Sławińska, U., Miazga K., Jordan L. M. (2014) The role of serotonin in the control of locomotor movements and strategies for restoring locomotion after spinal cord injury. *Acta Neurobiol Exp*, 74: 172–187.
31. Tabakow, P., Jarmundowicz W., Czapiga B., Fortuna W., Miedzybrodzki R., Czyz M., Huber J., Szarek D., Okurowski S., Szewczyk P., Gorski A., Raisman G. (2013) Transplantation of autologous olfactory ensheathing cells in complete human spinal cord injury. *Cell Transplantation*, 22: 1591–1612.
32. Wilcox, J. T., Satkunendrarajah K., Zuccato J. A., Nassiri F., Fehlings M. G. (2014) Neural precursor cell transplantation enhances functional recovery and reduces astrogliosis in bilateral compressive/contusive cervical spinal cord injury. *Stem Cells Transl Med*, 3: 1148–1159.
33. Yamamoto, M., Raisman G., Li D., Li Y. (2009) Transplanted olfactory mucosal cells restore paw reaching function without regeneration of severed corticospinal tract fibres across the lesion. *Brain Research*, 1303: 26–31.
34. Yin, F., Guo L., Meng C. Y., Liu Y. J., Lu R. F., Li P., Zhou Y. B. (2014) Transplantation of mesenchymal stem cells exerts anti–apoptotic effects in adult rats after spinal cord ischemia–reperfusion injury. *Brain Res*, 1561: 1–10.
35. Zhao, X. M., He X. Y., Liu J., Xu Y., Xu F. F., Tan Y. X., Zhang Z. B., Wang T. H. (2019) Neural stem cell transplantation improves locomotor function in spinal cord transection rats associated with nerve regeneration and IGF–1 R expression. *Cell Transplant*, 28: 1197–1211.
36. Zhou, H. L., Zhang X. J., Zhang M. Y., Yan Z. J., Xu Z. M., Xu R. X. (2016) Transplantation of human amniotic mesenchymal stem cells promotes functional recovery in a rat model of traumatic spinal cord injury. *Neurochem Res*, 41: 2708–2718.

Małgorzata Zawadzka, Anna Kwaśniewska, Krzysztof Miazga, Urszula Sławińska, Instytut Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN, Warszawa. E–mail: m.zawadzka@nencki.edu.pl

NEUROMODULACJA – MAGNETYCZNA I ELEKTRYCZNA INGERENCJA W PRACĘ MÓZGU

Małgorzata Kossut (Warszawa)



Streszczenie

Nieinwazyjna modulacja pobudliwości mózgu to nowa gałąź badań neuronaukowych i nowa możliwość działań terapeutycznych. W artykule opisane są dwie metody: przezczaszkowa stymulacja magnetyczna i przezczaszkowa stymulacja prądowa, prądem stałym lub zmiennym. Opisane są w skrócie sposoby działania stymulatorów i wpływ obu rodzajów stymulacji na aktywność mózgu. Podane są najpopularniejsze sposoby zastosowania neuromodulacji w leczeniu chorób układu nerwowego i we wzmacnianiu procesów pamięciowych. Na koniec rozważane są możliwe ujemne strony stosowania długotrwałych terapii neuromodulacyjnych.

Abstract

Non-invasive modulation of brain excitability is a new branch of neuroscience research and a new opportunity for therapeutic activities. The article describes two methods: transcranial magnetic stimulation and transcranial current stimulation with direct or alternating current. The mode of function of stimulators and the effect of both types of stimulation on brain activity are briefly described. The most popular ways of using neuromodulation in attempts to cure diseases of the nervous system and in attempts at strengthening memory processes are given. Finally, possible disadvantages of using long-term neuromodulatory therapies are considered.

Dawniej neuromodulacją nazywano wpływ na neurony mózgu takich neuroprzekaźników jak dopamina, acetylocholina, noradrenalina czy serotonina. Nie przenosiły one informacji o bodźcach czuciowych, ale zmieniały gotowość neuronów do przyjęcia i przetworzenia informacji o tych bodźcach. Z czasem termin ten został zaadoptowany przez nową gałąź medycyny zajmującą się oddziaływaniem bezpośrednio na neurony przy pomocy pola magnetycznego i prądu elektrycznego. W tym artykule skupię się na nieinwazyjnej stymulacji przezczaszkowej (istnieje też tzw. głęboka stymulacja mózgu, stosowana np. w terapii choroby Parkinsona; ta technika wymaga otwarcia czaszki, a także przezskórna stymulacja nerwu błędnego).

Przeznaczona stymulacja magnetyczna

Przeznaczona stymulacja magnetyczna (TMS) to technika neuromodulacyjna używana od 30 lat. W tej technice zmienne pole magnetyczne wzbudza, poprzez indukcję elektromagnetyczną, pobudzenie elektryczne w wybranym obszarze kory mózgowej. Stymulator generujący impuls prądowy połączony jest z cewką magnetyczną, która przylega do czaszki. Stymulator zawiera kondensator generujący przy rozładowaniu przepływ prądu o napięciu do 3000 V i natężeniu do 20 000 A. Prąd przepływa przez cewkę, indukując pole magnetyczne o natężeniu około 2–3 Tesla. Dla pola magnetycznego kości czaszki nie stanowią przeszkody, jego właściwości fizyczne pozwalają na przeniknięcie przez skórę, kość czaszki i opony mózgowo-rdzeniowe. Po dotarciu do kory mózgowej pole magnetyczne indukuje w niej przepływ prądu, w płaszczyźnie równoległej do główicy, co z kolei prowadzi do depolaryzacji błony komórkowej neuronów i aktywacji kory położonej bezpośrednio pod cewką. To pobudzenie może, poprzez synapsy i kolejne neurony, rozchodzić się do struktur mózgu, z którymi dany obszar kory mózgowej jest połączony. Kierunek i siła prądu zależą od układu aksonów i niehomogennych własności przewodnictwa tkanki. Jeśli

np. akson leży wzdłuż linii sił pola elektrycznego, nie uzyska się żadnego efektu.

TMS daje więc możliwość elektrycznej stymulacji mózgu bez użycia elektrod [10]. Zasięg stymulacji to tylko kilka milimetrów, nie da się więc pobudzić głębokich struktur mózgu.

Reakcja na pobudzenie kory mózgowej pojedynczym pulsem TMS zależy od stymulowanego obszaru. Jeśli jest to kora ruchowa, nastąpi skurcz odpowiedniej grupy mięśni. Wielkość tego skurczu (amplitudę potencjału wywołanego w mięśniu) można zarejestrować za pomocą elektromiografu. Pobudzenie kory ruchowej w miejscu wywołującym ruch palców dłoni lub stóp jest wykorzystywane do sprawdzenia, czy u nieprzytomnego pacjenta nie ma przerwania rdzenia kręgowego (czy impuls z kory ruchowej może przejść przez nieuszkodzone drogi korowo-rdzeniowe). Jeśli impuls podamy na korę wzrokową, może wywołać fosfeny – błyski światła widziane przy zamkniętych oczach. Pojedynczy impuls podany do odpowiedniego obszaru kory może zakłócić przebiegające w tej chwili w tym obszarze interakcje neuronów – w ten sposób można na przykład udowodnić zaangażowanie danego miejsca kory w wybrane procesy percepcyjne.

TMS daje możliwość mapowania połączeń w mózgu – efekty widać nie tylko w strukturze stymulowanej, ale także w obszarach, do których ta struktura wysyła połączenia. Na przykład najprostszym sposobem sprawdzenia, czy pacjent w długotrwałej śpiączce może odzyskać świadomość, jest założenie na jego głowę czepka elektrod EEG i pobudzenia kory potylicznej impulsem TMS. Jeśli depolaryzacja wywołana przez impuls TMS dotrze z kory potylicznej do kory przedczołowej, to znaczy, że długoaksonalne połączenia wewnątrzkorowe, będące podstawą integracji przedomózgowia potrzebnej do świadomości, są sprawne i istnieje możliwość odzyskania świadomości.

TMS daje możliwość wyciszenia lub pobudzenia badanej okolicy kory mózgowej. Można to osiągnąć stosując nie pojedynczy impuls, ale ciągi impul-

sów, tzw. *repetitive TMS* (rTMS). Impulsy podawane z częstotliwością ok. 1 Hz lub mniejszą powodują wyhamowanie kory; natomiast z częstotliwością ok. 4 Hz mają działanie pobudzające. Takie efekty utrzymują się przez kilka – kilkadziesiąt minut po zakończeniu stymulacji. W przypadku stymulacji hamującej tworzymy coś, co nazywa się „wirtualną leżją”, czyli chwilowe zablokowanie aktywności wybranego obszaru kory. Dziesiątki prac używały tej techniki do udowodnienia udziału badanego obszaru kory w badanej funkcji mózgu. Pierwszym pokazem możliwości tej metody było chwilowe zahamowanie mowy na skutek „wirtualnej leżji” pola Broca u zdrowych ochotników [5]. W znanym badaniu dotyczącym plastyczności mózgu osoby badane miały przez tydzień zasłonięte oczy i uczyły się czytać alfabetem Braille’a. Po tygodniu pokazano, że na bodźce dotykowe (wytłoczone litery Braille’a) reaguje nie kora somatosensoryczna, ale kora wzrokowa – nastąpiło plastyczne przeorganizowanie mózgu. Dowiedziono tego zakłócając przy pomocy TMS aktywność kory wzrokowej – badani nie potrafili wtedy odróżnić liter Braille’a.

Terapia z użyciem TMS

Czy oprócz badan naukowych i diagnostyki medycznej TMS można stosować w celach terapeutycznych? Na to pytanie liczne zespoły specjalistów od lat starają się znaleźć odpowiedź. Bardzo duże nadzieje wiązano z włączeniem stymulacji TMS do neurorehabilitacji po udarze. Najczęściej badanym wariantem było wyciszenie przez TMS hamowania międzypółkulowego. W obszarach ruchowych i czuciowych kory mózgowej wpływ jednej półkuli mózgu na drugą jest hamujący. Przypuszczano, że np. przy jednostronnym uszkodzeniu kory ruchowej przez udar, hamujące wpływy z drugiej, nieuszkodzonej półkuli mogą osłabiać zmiany plastyczne, jakie rehabilitacja chce wywołać w nieuszkodzonych obszarach wokół ogniska udaru. Wobec tego wyciszenie kory ruchowej w zdrowej półkuli podczas zabiegów rehabilitacyjnych mogłoby wspomagać proces zdrowienia. W niektórych próbach udało się polepszyć proces rehabilitacji [8], ale były też liczne porażki. Próby podejmowano także w terapii afazji (słaby efekt) i zaniedbywania stronnego (bardziej obiecujące wyniki).

Wpływ pobudzenia mózgu przy pomocy TMS na uczenie się i pamięć badano w wielu eksperymentach. Dwie najważniejsze koncepcje badań prowadzonych w tym kierunku to wzmożenie pobudliwości grzbietowo-bocznej kory przedczołowej oraz próby pobudzania obszarów kory mających projekcje do hipokampa. W pierwszym wariantcie badano wpływ pobudzenio-

wej stymulacji kory przedczołowej na pamięć operacyjną, uzyskując na ogół pozytywne, choć niewielkie wyniki. W drugim pobudzano tylną korę ciemieniową, licząc na to, że wzbudzi to aktywację hipokampa – po takim zabiegu zapamiętywanie par „twarz – słowo”, zadanie zależne od hipokampa, było lepiej wykonywane [9]. Badanie spoczynkowego fMRI pokazało, że w wyniku stymulacji wzrasta siła połączeń pomiędzy korą ciemieniową a hipokampem.

Redukcja chronicznego bólu była przedmiotem szeregu eksperymentów, w których próbowano przy pomocy TMS stłumić bóle neuropatyczne. Pomimo pozytywnych wyników w małych grupach eksperymentalnych, metaanaliza nie wykazała skuteczności klinicznej. (Cochrane Database Rev. System 2018). Podejmowane są też próby leczenia migreny z aurą.

W 2008 roku Food and Drug Administration (FDA) zaakceptowała TMS jako terapię na depresję, zwłaszcza lekooporną. Kilkutygodniowa codzienna sesja pobudzania grzbietowo-bocznej kory przedczołowej przynosi pozytywne wyniki, ze skutecznością podobną do działania Prozacu. Mimo tego, że najnowsza metaanaliza Cochrane Database nie znajduje istotnego polepszenia po terapii, jest ona obecnie powszechnie stosowana, także na chorobę dwubiegunową.

W 2018 roku FDA pozwoliło stosować tzw. głęboki TMS (o nieco większym zasięgu, wykonywany przy pomocy dwóch cewek w kształcie H) w terapii zburzenia obsesyjno-kompulsywnego. Obszary, które w różnych próbach stymulowano, to grzbietowo-boczna kora przedczołowa, kora oczodołowo-czołowa i obszar tuż do przodu od kory przedruchowej, który jak dotąd dawał największą poprawę.

Podejmuje się także próby zastosowania stymulacji TMS w leczeniu schizofrenii. Pozytywne rezultaty zostały zarejestrowane w wielu ośrodkach. Pokazano w nich, że stymulacja kory przedczołowej redukuje negatywne objawy schizofrenii, silniej u pacjentów młodych niż u starszych [1].

Przeznaczkowa stymulacja prądem stałym (tDCS, *transcranial direct current stimulation*)

tDCS to popularna, nietrudna i tania metoda modulowania poziomu pobudzenia kory mózgowej. Wystarczy 9-woltowa baterijka i dwa przewody osadzone w nasączonych wodą gąbkach, czyli elektrody. Jedną elektrodę umieszcza się na ogół na czole, drugą na potylicy lub skroni. Można też umieszczać po jednej na każdej półkuli. Pomiędzy elektrodami przepływa prąd, przechodząc przez mózg, aby zamknąć obwód elektryczny.

To, czy tak słaby prąd dociera do kory mózgowej, było kwestionowane, gdyż badania post mortem

wykonane na ludziach nie znalazły znaczącego przepływu. Jednak doświadczenia na żywych małpach potwierdziły istnienie wpływu tDCS na reaktywność kory. Kierunek przepływu prądu moduluje potencjał spoczynkowy błony neuronów. Stymulacja anodowa depolaryzuje neurony, zwiększając prawdopodobieństwo wystąpienia potencjału czynnościowego, natomiast stymulacja katodowa hiperpolaryzuje błonę, sprawiając, że neurony robią się mniej reaktywne. Przyjmuje się, że prąd anodowy ma wpływ facylitujący, a prąd katodowy wpływ hamujący na zadania związane z obszarem kory pod elektrodą [4].

Ze względu na to, że stymulator DCS jest tani i łatwy w użyciu, a także bezpieczny, jest szeroko stosowany poza laboratoriami i jako samoróbka i w oferowanych przez różne firmy urządzeniach. Reklamy mówią, że stymulacja wzmacnia funkcje poznawcze, w tym pamięć i abstrakcyjne rozumowanie, podnosi nastrój i energię, polepsza umiejętności potrzebne do gier wideo, a nawet sprawność fizyczną. Stosowali ją już sportowcy na olimpiadach, a także zawodowi gracze w gry komputerowe.

Próby wzmacniania funkcji poznawczych przez tDCS były przeprowadzane we wszystkich domenach poznawczych – od uwagi i pamięci do percepcji, nabywania języka obcego, koordynacji wzrokowo-ruchowej i inteligencji. Mimo tego, że większość z doświadczeń była przeprowadzana na niewielkich grupach osób badanych i z marnymi grupami kontrolnymi, niektóre metaanalizy wykazują korzystny wpływ stymulacji. Jednak ostatnia metaanaliza badająca wpływ tDCS na długotrwałą pamięć epizodyczną nie znalazła żadnego efektu stymulacji [3].

Wyniki mogą zależeć od bardzo wielu zmiennych – okresu i długości stymulacji, rodzaju zadania pamięciowego, trwania treningu itp. Bardzo interesującym tłumaczeniem wpływu tDCS na pamięć i szerzej na plastyczność kory mózgowej przedstawiła H. Barron i współpracownicy z Oxfordu. Stosując anodowy tDCS zdołali obniżyć poziom GABA, hamującego neuroprzekaźnika, w stymulowanym obszarze mózgu, co zarejestrowano przy pomocy spektroskopii w rezonansie [2]. Spowodowało to przywrócenie wspomnień, których uprzednio badani nie mogli sobie przypomnieć. Takie obniżenie poziomu GABA u pacjentów po udarze mogłoby ułatwiać plastyczność obwodów neuronalnych kory mózgowej i wspomagać skuteczność zabiegów neurorehabiliacyjnych. Jednak próba wspomaganie stymulacją tDCS podarowego naprawiania zdolności poruszania bezwładną ręką, przy zastosowaniu terapii z użyciem robota, nie wykazała wpływu stymulacji – sam trening z robotem dawał efekt taki sam, jak połączone dwie techniki.

Stymulacja prądem zmiennym (tACS *transcranial alternating current stimulation*)

Metoda ta jest podobna do stymulacji prądem stałym, lecz wymagająca bardziej złożonego stymulatora. Częstotliwość zmiennych impulsów ustawia badający. Takie pobudzenie może zmienić własne oscylacje zachodzące w stymulowanym obszarze kory i wymusić dostosowanie się do swojego rytmu. Nieprawidłowe oscylacje są związane z licznymi stanami patologicznymi mózgu, perspektywa ich znormalizowanie poprzez nieinwazyjną stymulację jest kusząca.

Pozytywne wyniki na przypomnienie i na pamięć operacyjną otrzymano wzbudzając przy pomocy tACS odpowiednie oscylacje w istotnych dla tych zjawisk obszarach kory mózgowej. Duże zainteresowanie wzbudziło doświadczenie, w którym przez tACS poprawiono synchronizację rytmu theta i pamięć w korze mózgowej osób starszych. Wydajność pamięci operacyjnej zależy od związku pomiędzy rytмами gamma i theta. W płacie skroniowym u młodych ludzi, kiedy pamięć jest sprawna, amplituda rytmu gamma jest sparowana z fazą rytmu theta. Dodatkowo uważa się, że synchronizacja fazy rytmu theta pomiędzy płatem czołowym a płatem skroniowym odzwierciedla wpływ kory czołowej na przetwarzanie i przechowywanie informacji w płacie skroniowym. U starych ludzi słabnie pamięć i zanika związek pomiędzy rytmem theta i gamma. Stymulacje tACS w rytmie theta udowodniły więc przyczynową pomiędzy tymi oscylacjami a pamięcią operacyjną – u ludzi starych już 12 minut stymulacji poprawiło związek rytmów theta–gamma i poprawiło pamięć [6].

W ubiegłym roku pokazano wyniki ciekawego doświadczenia, demonstrującego możliwość spotęgowania procesów umysłowych przez tACS. Pobudzano biegun płata skroniowego w prawej półkuli mózgu; jest to miejsce związane z rozumieniem tzw. „ukrytego” znaczenia języka, takiego jak żarty lub metafory. Stymulacja o częstotliwości 40 Hz, czyli takiej jak obserwowane w EEG oscylacje gamma, spowodowała zwiększenie prawdopodobieństwa wystąpienia momentu Eureka! czyli znalezienia nieoczywistego rozwiązania zagadki słownej [7].

Podsumowanie

Modulacja pobudliwości mózgu przez nieinwazyjne, przeczaszkowe stymulacje wydaje się techniką przyszłości. Liczba publikacji na ten temat rośnie lawinowo. Należy się spodziewać, że lepiej kontrolowane eksperymenty, na większej liczbie pacjentów,

wkrótce ustalą odpowiednie parametry stymulacji i skuteczne terapie wielu schorzeń. Mamy wyraźną ofensywę, zarówno małych startupów, jak i znanych firm w konstruowaniu stymulatorów i ustawianiu procedur do terapii schizofrenii, choroby Alzheimera, padaczki, deficytów po udarach mózgu, a także zaburzeń neurorozwojowych, jak dyskalkulia, dysleksja i autyzm.

Metody przeczaszkowej neurostymulacji są młode i trzeba sobie zdawać sprawę z tego, że możliwe szkodliwe efekty stosowania przeczaszkowej stymulacji, zarówno TMS jak i prądowej, nie są dobrze poznane. Wiadomo, że TMS może wywołać atak epileptyczny, co na szczęście zdarza się bardzo rzadko. Z badań na zwierzętach wiadomo, że obniża poziom GABA w mózgu, co na dłuższą metę może zachwiać równowagę pobudzenie/hamowanie i przynieść niekorzystne konsekwencje. Podobnie obniżanie poziomu GABA przez tDCS ma nieznane długofalowe skutki. Niewiele wiadomo o działaniu na struktury odległe od miejsca stymulacji, a mogą w nich wystąpić niekorzystne i niespodziewane zmiany.

Istnieje również możliwość, że wzmocnienie niektórych funkcji poznawczych może się odbywać kosztem osłabienia innych. Silniejsza aktywność jednej sieci w mózgu może osłabić sprawność drugiej, będącej z nią w interakcji. Nie ma jeszcze badań na ten temat, bo niewiele doświadczeń bada wykonanie więcej niż jednego zadania. Co więcej, skutek terapii może mieć długotrwały wpływ o nieznanym kierunku na inne struktury i ten wpływ może się rozwijać dopiero po zakończeniu stymulacji, jeśli wywołała ona kaskadę procesów napędzających się nawzajem. Po prostu nie wiadomo, jakie mogą być długofalowe konsekwencje przeczaszkowej stymulacji mózgu.

Ponadto neuroetycy zwracają uwagę na inny aspekt – sztucznego wzmocnienie pracy mózgu. Takie wzmocnienie może być przydatne podczas uczenia się (i nie daje niepożądanych efektów obwodowych, jak np. kawa), ale także podczas egzaminów...

Bibliografia

1. Aleman A, Enriquez-Geppert S, Knegtering H, Dlabac-de Lange JJ. (2018). Moderate effects of noninvasive brain stimulation of the frontal cortex for improving negative symptoms in schizophrenia: Meta-analysis of controlled trials. *Neurosci Biobehav Rev.* 89, 111–118.
2. Barron HC, Vogels TP, Emir UE, et al. (2016). Unmasking Latent Inhibitory Connections in Human Cortex to Reveal Dormant Cortical Memories. *Neuron* 90, 191–203.
3. Galli G, Vadillo MA, Sirota M, Feurra M, Medvedeva A. (2019) A systematic review and meta-analysis of the effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) on episodic memory. *Brain Stimul.* 12, 231–241.
4. Nitsche MA, Cohen LG, Wassermann EM, et al. (2008) Transcranial direct current stimulation: State of the art 2008. *Brain Stimul.* 1, 206–223.
5. Pascual-Leone A, Gates JR, Dhuna A. (1991) Induction of speech arrest and counting errors with rapid-rate transcranial magnetic stimulation. *Neurology* 41, 697–702.
6. Reinhart RMG, Nguyen JA. (2019) Working memory revived in older adults by synchronizing rhythmic brain circuits. *Nat. Neurosci.* 22, 820–827.
7. Santarnecchi E, Sprugnoli G, Bricolo E, et al. (2019) Gamma tACS over the temporal lobe increases the occurrence of Eureka! moments. *Sci Rep.* 9, 5778
8. Seniów J, Bilik M, Leśniak M, Waldowski K, Iwański S, Członkowska A. (2012) Transcranial magnetic stimulation combined with physiotherapy in rehabilitation of poststroke hemiparesis: a randomized, double-blind, placebo-controlled study. *Neurorehabil Neural Repair.* 26, 1072–1079.
9. Wang JX, Voss JL. (2015) Long-lasting enhancements of memory and hippocampal-cortical functional connectivity following multiple-day targeted noninvasive stimulation. *Hippocampus.* 25, 877–883.
10. Zyss T. (red.) (2009) Technika przeczaszkowej stymulacji magnetycznej: zagadnienia aparaturowe. Wydawnictwo Medyczne. Kraków 2009.