
Transkranijinės magnetinės stimuliacijos (TMS) taikymas regos žievės tyrimuose

V. Valiulis*
K. Dapšys*
O. Rukšėnas**

*Respublikinės Vilniaus psichiatrijos ligoninės Elektrofiziologinių tyrimų ir gydymo metodų skyrius

**Vilniaus universiteto Gamtos mokslų fakultetas

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjami regos žievės tyrimai, taikant transkranijinę magnetinę stimuliaciją (TMS). Pagrindinis dėmesys skiriamas magnetine stimuliacija sukeltiems fosfenams ir skotomoms bei jų tarpusavio funkciniam sąryšiui. Pažymima, kad fosfenų fenomeną lemia kelios atskiros smegenų sritys, nuo V1 zonos pirminėje regos žievėje iki aukštesniųjų sričių, apimančių V2 zoną, baltosios medžiagos laidus ir kitas pakaušio žievės dalis. Analizuojama, kaip skirtingų smegenų sričių įtaka pasireiškia kompleksinėse fosfenų charakteristikose: formoje, spalvoje, tekstūroje, topografijoje. Atsižvelgiant į TMS aparatūros tikslumo tobulėjimą ir išorinių faktorių, modifikuojančių regos žievės sužadinimą bei fosfenų potyrį, valdymą, ieškoma būdų, padėsiančių analizuoti atskirų regos žievės sričių funkcines charakteristikas per jų santykį su subjektyviais fosfenų ir skotomų bruožais.

Raktažodžiai: transkranijinė magnetinė stimuliacija, TMS, regos žievė, V1, V2, fosfenai, skotomos.

Neurologijos seminarai 2010; 14(43): 21–25

ĮVADAS

Mokslo ir technologijų progresas lėmė spartų neurovaizduojamųjų tyrimo metodų tobulėjimą ir plėtrą. Fundamentaliuose smegenų funkcijų tyrimuose ir klinikinėje praktikoje naudojamas transkranijinės magnetinės stimuliacijos (TMS) metodas pradėtas taikyti ir Lietuvoje. Šiuo straipsniu siekiama supažindinti skaitytoją su šiuo pasaulyje populiariu, tačiau mūsų šalyje dar ganėtinai retai taikomu metodu ir jo galimybėmis regimosios sistemos tyrimuose.

Transkranijinė magnetinė stimuliacija (TMS) – tai metodika, įgalinanti tyrėjus stimuliuoti smegenis neinvaziniu būdu, tiriamajam išliekant sąmoningam ir budriam. Stimuliacijos metu galima tiesiogiai stebėti ir analizuoti tiriamojų elgseną [1]. TMS veikia elektros indukcijos principu, kaukolę pereinančiam kintamam magnetiniam laukui generuojant elektrinį lauką pasirinktoje smegenų žievės srityje. TMS galima paveikti įvairias galvos smegenų žievės sritis, todėl metodika taikoma nuo sensorikos (regos, klausos) ir motorikos iki sudėtingų kognityvinių funkcijų tyrimų ir diagnostikos. Užsienio laboratorijose paplitę regos sistemos TMS tyrimai ne tik padeda atsakyti į fundamentalius klausimus apie šio jutimo neuroninę sąrangą, bet taip pat leidžia nustatyti sąryšius su kitomis smegenų funkcijomis bei patologijomis. Smegenų žievės regos sričių stimuliacija parodo ne vien tik regos sistemos būklę ir individualius jos bruožus, bet ir atspindi tokius veiksnius kaip bendras sme-

genų žievės sužadinimas, spontaninės alfa dažnio elektroencefalogramos (EEG) fluktuacijos bei migrena [2–4].

TMS TAIKYMAS PAKAUŠIO SRITYJE. FOSFENAI

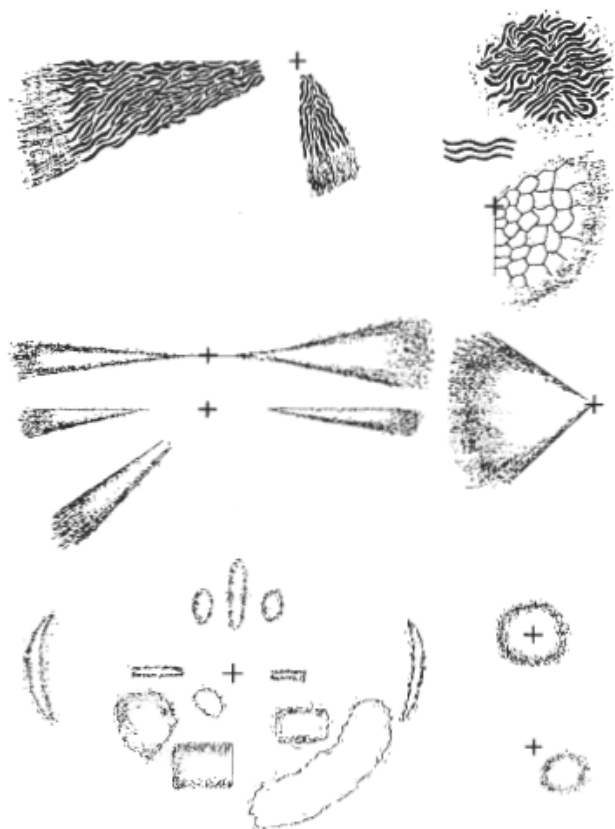
Fosfenai – tai šviesos blyksnių suvokimas, kurio atsiradimas nėra susijęs su šviesa sužadintais akies tinklainės fotoreceptoriais [5]. Fosfenų jutimas gali būti sukeltas keliais skirtingais būdais, veikiančiais atskiras regos sistemos dalis nuo akies obuolio iki smegenų žievės. Dėl to fosfenai yra patogus būdas tirti atskirų nervų sistemos dalių, ypač galvų smegenų žievės pakaušinių sričių, įtaką regos jautimui ir suvokimui. Laboratorijoje taikomi fosfenų sukėlimo metodai apima tiesioginę elektrinę regos žievės stimuliaciją ir pakaušio srities transkranijinę magnetinę stimuliaciją (TMS). Pastaroji naudojama dažniau, nes yra neinvazinė ir saugi, todėl gali būti taikoma kliniškai sveikiems tiriamiesiems [6].

Dauguma tiriamųjų pakaušio srities TMS metu teigia matantys panašius fosfenus, tačiau egzistuoja ir individualių skirtumų. Stimuliuojant apibrėžtą sritį, fosfenų matymo vieta yra ganėtinai pastovi, tačiau ji skiriasi tarp individų. Nors dažniausiai fosfenai yra suvokiami kaip paprasti šviesos blyksniai, kai kuriems tiriamiesiems jie įgauna sudėtingą struktūrą ir tekstūrą (1 pav.) [7].

Kammer su kolegomis 2005 metais atliktame tyrime fosfenai visuomet buvo regimi pilkos arba baltos spalvos [8]. Jie tiriamiesiems priminė trumpalaikius debesėlius arba burbulus, dažnai turinčius apibrėžtą kontūrą, kuri buvo galima nupiešti. Beveik visais atvejais fosfenai buvo matomi apatinėje regos lauko dalyje, žemiau horizontalaus meridiano. Suvokiamas fosfenų dydis gali kisti, nes fosfenai,

Adresas:

V. Valiulis
Respublikinė Vilniaus psichiatrijos ligoninė,
Elektrofiziologinių tyrimų ir gydymo metodų skyrius
Parko g. 15, LT-11205 Vilnius
Tel. (8 680) 17 797, el. paštas: vladas.valiulis@gmail.com.



1 pav. Komplexinės struktūros ir tekstūros fosfenų pavyzdžiai (tiriamųjų asmenų piešiniai, pliuso ženklas – regos lauko centras) [7]

kaip ir povaizdžiai, paklūsta Emerto dėsniai – atrodo didesni, didinant atstumą iki fiksacijos taško [9]. Taip pat nustatyta, kad periferiniai fosfenai sukeliama lengviau nei centriniai, bei horizontalaus meridiano fosfenai sukeliama lengviau nei vertikalaus meridiano [7].

SLOPINANTIS STIMULIACIJOS EFEKTAS

Verta paminėti, kad dėl TMS smegenyse vyksta ne tik žadinantys, bet ir slopinantys procesai. Slopinantis magnetinės stimuliacijos efektas pakaušio srityje paprastai pasireiškia skotomomis – aklomis arba sumažėjusio matymo zonomis regimajame lauke [10]. Kammer su kolegomis nustatė, kad fosfenų slenkstis yra žemesnis už regimojo slopinimo slenkstį [8]. Didinant stimuliacijos intensyvumą, fosfenus pastebėti tampa vis sunkiau, kol galiausiai jie tampa nematomi. Gali būti, kad tai priklauso ne tik nuo su didėjančiu intensyvumu išryškėjančių slopinančių procesų, bet ir nuo pačių fosfenų ploto didėjimo, didinant magnetinę stimuliaciją, dėl to tampa sunku nustatyti didelių fosfenų kontūrus. Marg ir Rudiak teigimu, tokiais atvejais TMS turint įtakos regimas ne šviesos blyksnis, bet drumsnumas regos lauke, panašus į skotomą [7]. Šis potyris dar vadinamas „negatyviu“ fosfenu ir apibūdinamas kaip „tamsesnis už juodą“. Dar papildomai padidinus stimuliacijos intensyvumą, tose vietose atsiranda skotomos [8].

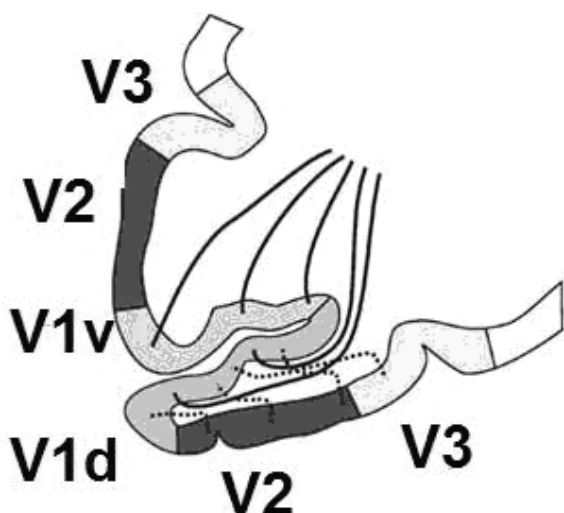
Slopinimo tyrimai rodo tikslią skotomų retinotopiją. Pateikiant didelį tekstūrinį šabloną, pvz., iš linijų sudarytą gardelę, po to einantis TMS impulsas sukelia pilką skylę arba skotomą regimajame lauke. Šios skylės padėtis gardelėje keičiasi pagal ritės poziciją skalpo atžvilgiu, ir atitinka tiesioginės elektrinės stimuliacijos būdu nustatytą regimosios žievės topografiją [10–11].

FOSFENŲ ATsirADIMĄ SĄLYGOJANČIOS SMEGENŲ SRITYS

Nepaisant ankstesnių atradimų, funkcinis sąryšis tarp fosfenų ir skotomų iki šiol nėra visiškai suprantamas. Tiksliai TMS aktyvuojama sritis pakaušio žievėje taip pat išlieka debatų objektu [8]. Nors pradiniai tyrimai leido spėti, jog šiuos efektus lemia V1 srities stimuliacija, yra duomenų, minėtus efektus leidžiančių priskirti V2 / V3 ir kitoms sritims.

Pagal vieną hipotezę, V1 sritis veikia kaip žievinė tinklainė, erdvėje išskleisdama jau apdorotą regimąją informaciją [12]. Kiti aiškinimai V1 priskiria tiesioginį ir nepriklausomą regimąjį suvokimą bei atskirus suvokinius (angl. *qualia*). Stoerig teigia, kad pagrindinis V1 vaidmuo yra apdorotos informacijos surinkimas grįžtamojo ryšiu iš už pirminės regos žievės ribų esančių sričių ir iš to sekantis suvokinio generavimas [12]. Regos sistemos tyrimai, pasižymintys aukšta laikine skiriamąja geba, rodo, kad keturiasdešimt milisekundžių po to, kai šviesa pasiekia tinklainę, aktyvuojama pirminė regos žievė (V1), kuri išskiria dirgiklio orientaciją ir erdvinį dažnį. Tik 10 milisekundžių vėliau už pirminės regos žievės ribų esančios sritys spėja apdoroti dirgiklio spalvą, judesį, erdvinį gylį ir kitas kompleksines charakteristikas [13]. Po to ši kompleksinė informacija perduodama atgal į V1 sritį. Kitais žodžiais tariant, V1 gali veikti kaip privalomas informacijos tiekėjas ją toliau apdorojantiems mechanizmomis aukštesnėse regimosios žievės srityse ir kartu kaip grįžtamojo ryšio, generuojamo tų pačių aukštesniųjų sričių, gavėjas. Kiti autoriai pritaria požiūriui, jog jungtys tarp atskirų regimųjų sričių daugeliu atvejų yra reciprokinės, įgalinančios intensyvu dviejų krypčių informacijos sklidimą hierarchiškai skirtingų struktūrų viduje ir tarp jų [14].

Vis dėlto svarbus V1 vaidmuo regimajame suvokime savaime nereiškia, kad fosfenai ir skotomos yra generuojami išimtinai šioje srityje. Reikia nepamiršti, kad TMS impulsas gali aktyvuoti ganėtinai platų nervinių struktūrų tinklą. Dabartinės žinios apie tai, kaip skirtingi neuronai ir neuroniniai tinklai reaguoja į TMS impulsus, taip pat yra labai ribotos. Nėra žinoma, ar piramidiniai neuronai yra veikiami tiesiogiai, ar per interneuronus (žadinančius bei slopinančius) [15]. Iki šiol neįmanoma tiksliai nustatyti TMS stimuliuojamą gylį ir erdvinę raišką, taip pat nežinoma, kurie nerviniai elementai yra labiausiai jautrūs (mažiausio slenkščio) pasirinktoje smegenų srityje [16]. Dėl to reikia išanalizuoti ir gretimas regimosios sistemos sritis bei jų galimą vaidmenį generuojant fosfenus.



2 pav. Regimosios žievės struktūros, turinčios įtakos fosfenų suvokimui [8]

Kammer su kolegomis pateikia tokias, galimai už fosfenų generavimą ir vizualinio suvokimo slopinimą atsakingas, smegenų sritis: a) dryžuota žievė V1 zonoje; b) už dryžuotos žievės ribų esančios V2/V3 sritys; c) optinės radiacijos (angl. *optic radiation*); d) tarpžieviniai laidai, grįžtamoju ryšiu jungiantys V2/V3 sritis su V1 (2 pav.) [8]. Moliadze su kolegomis teigimu, stimuliuojant žmogaus pakaušinę žievę, tikėtina, jog vienu metu vyksta V1, V2 ir V3 sričių kostimuliacija [17].

Kaip žinoma, paprasti vaizdiniai šablonai yra apdorjami pirminės regimosios žievės sričių, kai sudėtingos erdvinės figūros ir jų atpažinimas taip apima aukštesniąsias, už pirminės regos žievės ribų esančias, sritis [12]. Dažnas magnetine stimuliacija sukeltų fosfenų pobūdis – paprastų šviesių taškų ar linijų išsidėstymas – leidžia konstatuoti pirminės regimosios žievės (V1) aktyvumą, kadangi tiesioginis V1 srities stimuliavimas elektrodais taip pat sukelia tokio tipo fosfenus [12]. Spėjama, jog paprasčiausi fosfenai ir ankstyvas regimojo suvokimo slopinimas gali būti sukelti vien pirminės regos žievės (V1) aktyvacijos, kai sudėtingesni, struktūrą ir tekstūrą įgaunantys fosfenai bei vėlyvasis regimojo suvokimo slopinimas apima aukštesniąsias V2/V3 sritis bei iš jų į pirminę regos žievę einančius grįžtamojo ryšio laidus. Hedge ir Van Essen tyrimai, 2006 metais atlikti su beždžionėmis, parodė esminę V2 ir V4 sričių funkciją, apdorojant regos dirgiklio kontūro ir tekstūros charakteristikas [14].

IŠORINIAI FAKTORIAI, TURINTYS ĮTAKOS FOSFENAMS ATSIKASTI

Nuo seno žinoma, kad regos sistemos jautrumą galima reikšmingai pakoreguoti, naudojant šviesos deprivaciją. Laikina šviesos deprivacija pasireiškia fiziologiniais ir funkciniais regimosios žievės pakitimais. Jie lemia greitą

žievės jautrumo padidėjimą, pasireiškiantį žemesniu fosfenų slenksčiu ir didesniu žievės sužadiniu veikiant impulsu, išmatuojamu funkcinio branduoliniu magnetiniu rezonansu (fBMR) [6]. Romei su kolegomis 2008 metais ištyrė, kad žema alfa dažnio galia pakaušinėse skiltyse didina fosfenų atsiradimo tikimybę, kai aukšta – mažina [4].

Išorinių veiksnių įtaka tuo nesibaigia. Aurora su kolegomis 2003 metais nustatė, kad migrena taip pat sukelia padidėjusį pakaušio žievės jautrumą ir mažina fosfenų slenkstį [2]. Antal su kolegomis, taip pat tyrė migrena sergančių ir sveikų žmonių fosfenų slenkščių vidurkius, neaptiko statistiškai reikšmingų skirtumų, nors sergantiems migrena nustatytas slenkščio vidurkis buvo žemesnis [3]. Aurora ir kolegų teigimu, migrena sukelia pakaušio žievės V1 zonos hiperjautrumą [2]. Manoma, kad vaizduotė ir vidiniai psichiniai vaizdiniai taip pat gali koreguoti fosfenų slenkstį. Keli autoriai parodė, kad vidiniai psichiniai vaizdiniai gali aktyvuoti tas pačias smegenų sritis kaip ir vaizdinis suvokimas [18]. Tačiau šie tyrimai neparodė reikšmingo V1 srities sužadimo, lyginant su baziniu lygiu. Teigiama, kad vaizduotė reikšmingiau aktyvuoja V2 ir V3 sritis nei V1 [18]. Nėra tiksliai žinoma, ar pirminė regos žievė reikšmingai aktyvuojama sapno metu, tačiau nekyla abejonių dėl V2/V3 žievės aktyvumo [12]. Vis dėlto negalima atmesti galimybės, kad miegant, per grįžtamojo ryšio laidus, V1 sritis taip pat yra paveikiama tam tikru laipsniu.

Kammer su kolegomis 2001 metais atliko tyrimą, kuriu parodė, kad fosfenų slenkščiai yra žemesni, naudojant horizontalios orientacijos indukuotą elektros srovę, smegenų pusrutulių atžvilgiu nukreiptą iš lateralių pusės į medialinę, taikant vienfazį TMS impulsą, ir iš medialinės į lateralinę, taikant dvifazį impulsą [19]. Vėliau buvo atrasta, kad optimali srovės kryptis yra tuomet, kai ji sudaro statų kampą su stimuliuojamų smegenų vingių kraštais [20]. Kadangi smegenų vingiai yra individualių formų, prieš parenkant deramą TMS sukeltos srovės orientaciją, būtina atlikti anatominę tiriamojo smegenų paviršiaus analizę.

Moliadze su kolegomis savo 2003 metų TMS fosfenų tyrime taikė vienos spalvos adaptaciją (tiriamieji prieš stimuliaciją žiūrėjo į vienos spalvos ekraną) [17]. Vėliau sukelti fosfenai buvo tos pačios spalvos kaip ir ekranas, netgi pranykus povaidžiui. Naudojant kelių spalvų adaptaciją, fosfeno spalva priklausė nuo jo vietos erdvėje ir atitiko ekrane toje vietoje buvusią spalvą [17]. Kadangi šis fenomenas pasireiškia ir išnykus povaidžiui, galima teigti, kad tai priklauso nuo išliekančio specifinio žievės sužadimo. Naudojant regimosios gardelės šabloną, slopinimo tyrime sukelta skotoma regimajame lauke atitinka prieš tai pateikto fono spalvą [10].

TIESIOGINĖ ELEKTRINĖ STIMULIACIJA

Taikant tiesioginę elektrinę regimosios žievės stimuliaciją, nustatyta, kad intražievinė (smailių elektrodų) stimuliacija reikalavo mažesnės srovės tiems patiems efektams sukelti, o matomi fosfenai buvo mažesni ir didesnio tankio,

nei taikant paviršinę stimuliaciją. Šie tyrimai taip pat parodė, kad, esant tiksliai žemos amplitudės stimuliacijai, fosfenai būna spalvoti, ir tik didinant amplitudę tampa baltais, pilkšvais arba gelsvais. Tai leidžia spėti, kad TMS daugeliu atvejų yra ne tik netiksliai, bet ir per didelio intensyvumo [21].

Tačiau netgi naudojant elektrodus, fosfenų žemėlapis netenkina universalaus stimuliavimo žemėlapio žievėje reikalavimų (skirtingai nei motorinis žemėlapis) ir kiekvienam pacientui yra nustatomas individualiai [21].

APIBENDRINIMAS IR ATEITIES TYRIMAI

Transkranialinė magnetinė stimuliacija (TMS) – tai galimas įrankis fundamentaliuose smegenų funkcijų, ypač regos sistemos, tyrimuose. Nuo kitų neinvazinių neurovaizduojamųjų metodų TMS skiriasi unikalia galimybe aktyvuoti atskirų smegenų žievės sričių neuronus [15]. Kai kitomis priemonėmis galima tik registruoti smegenų veiklą, TMS įgalina tą veiklą pakeisti, nepaliekant neigiamų ilgalaikių komplikacijų.

Didžioji dalis problemų, kylančių naudojant TMS regos sistemos tyrimuose, yra nulemta žinių, kaip skirtingų smegenų sričių neuronai reaguoja į TMS impulsus, trūkumo bei netikslios stimuliavimo procedūros. Pastarajai problemai spręsti buvo sukurti neuronavigaciniai TMS aparatai. Smegenų vaizdais paremta navigacija (angl. *Navigated Brain Stimulation*, NBS) įgalina tiksliai nustatyti TMS impulsų poziciją ir lokalizaciją trimatėje erdvėje. Veikimo principas yra paremtas infraraudonųjų spindulių šaltiniu ir detektoriumi. Šaltinio spinduliai, atsispindėję nuo daviklių, išdėstyti erdvėje ant tiriamojo galvos ir stimuliacijos ritės, registruojami detektoriaus. Ši sistema apskaičiuoja ir pavaizduoja TMS impulso sukeltą elektrinį lauką kaukolės viduje, ant tiriamojo anatominio branduolinio magnetinio rezonanso (BMR) smegenų vaizdo. Dėl to tampa įmanoma individualiai apskaičiuoti optimalią indukuotos srovės orientaciją kiekvienai stimuliuojamai smegenų sričiai, pagal smegenų vingių kraštus. Prieš TMS atlikus fBMR galima nustatyti ne tik individualų anatominį, bet ir funkcinį smegenų žemėlapi, aiškiai išskiriant atskirų sričių ribas ir koordinates. Dėl to galima pasirinkti stimuliuojamas sritis, minimizuojant kitoms sritims tenkantį poveikį [22]. Individualus stimuliavimo zonos nustatymas kiekvienam tiriamajam fosfenų tyrime leidžia tiksliai įvertinti sukeltų fosfenų retinotopiją. Kiekybinis dėl atskirų regos žievės sričių stimuliacijos atsirandančių fosfenų charakteristikų palyginimas galėtų padėti atsakyti į klausimus apie funkcinius šių sričių skirtumus.

Ateities tyrimų pagrindinis uždavinys turėtų būti stimuliacijos tikslumo didinimas, mažinant poveikio zonos platumą. Tikslumas padidėtų ir optimizuojant stimuliacijos intensyvumą. Tam tikslui deprivacija būtų galima sumažinti stimuliuojamos srities slenkstį, naudoti adaptaciją skirtingoms fosfenų savybėms, kurios efektą įrodė Moliadze su kolegomis savo 2003 metų tyrime su spalvotais

fosfenais [17]. Tikslus laiko matavimas tarp TMS impulso pateikimo ir fosfenų suvokimo, stimuliuojant V1 ir kitas sritis, padėtų atsakyti į klausimą, ar subjektyvus fosfenų suvokimas iš tiesų yra generuojamas pirminėje regos žievėje.

Kammer su kolegomis pastebėjo, kad fosfenų slenkstis yra žemesnis už regimojo slopinimo slenkstį [8]. Tai rodo, kad, didinant stimuliacijos intensyvumą, slopinantys elementai regimojoje žievėje įsijungia vėliau nei žadinantys ir didelė dalimi funkciškai išlieka latentinėje būsenoje, kol aktyvumo balansas pasvyra jų naudai ir atsiranda skotomos. Galimi slopinančiųjų efektų skirtumai tarp atskirų sričių gali būti nustatyti skotomų slenkstčių ir retinotopijos šiose srityse tyrimais. Asmeniniams tiriamųjų fosfenų formos, tekstūros bei kitų savybių skirtumams iširti būtų galima taikyti testus, matuojančius individualius regimojo suvokimo skirtumus, ir ieškoti galimos koreliacijos. Taip pat galima prieš stimuliaciją naudoti manipuliacijas, kryptingai keičiančias vidinius psichinius vaizdinius ar kitus kintamus subjektyvius faktorius.

Gauta:
2010 01 29

Primta spaudai:
2010 02 18

Literatūra

- George MS, Belmaker RH. Transcranial magnetic stimulation in clinical psychiatry. American Psychiatric Publishing Inc., 2007.
- Aurora SK, et al. The threshold for phosphenes is lower in migraine. *Cephalgia* 2003; 23: 258–63.
- Antal A, et al. Higher variability of phosphene thresholds in migraineurs than in controls: a consecutive transcranial magnetic stimulation study. *Cephalgia* 2006; 26: 865–70.
- Romei V, et al. Spontaneous fluctuations in posterior alpha-band EEG activity reflect variability in excitability of human visual areas. *Cerebral Cortex* 2008; 18(9): 2010–8.
- Colman AM. Dictionary of psychology. Oxford University Press, 2003.
- Fierro B, et al. Modulatory effects of low- and high-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation on visual cortex of healthy subjects undergoing light deprivation. *Physiology* 2005; 565: 659–65.
- Marg E, Rudiak D. Phosphenes induced by magnetic stimulation over the occipital brain: description and probable site of stimulation. *Optometry and Vision Science* 1994; 71(5): 301–11.
- Kammer T, et al. Transcranial magnetic stimulation in the visual system. Characterization of induced phosphenes and scotomas. *Exp Brain Res* 2005; 160: 129–40.
- Cowey A, Walsh V. Magnetically induced phosphenes in sighted, blind and blindsighted observers. *Neuroreport* 2000; 11(14): 3269–73.
- Morgan M. Making holes in the visual world. *Nature Neuroscience* 1999; 2(8): 685–6.
- Kamitani J, Shimojo S. Manifestation of scotomas created by transcranial magnetic stimulation of human visual cortex. *Nature Neuroscience* 1999; 2(8): 767–71.
- Stoerig P. The neuroanatomy of phenomenal vision: a psychological perspective. Institute of Experimental Psychology, 2000.

13. Jehee JFM, et al. Interactions between higher and lower visual areas improve shape selectivity of higher level neurons – explaining crowding phenomena. *Brain Research* 2007; 1157: 167–76.
14. Hegde J, Van Essen DC. A comparative study of shape representation in macaque visual areas V2 and V4. *Cerebral Cortex* 2007; 17: 1100–16.
15. Bailey CJ, et al. Transcranial magnetic stimulation as a tool for cognitive studies. *Scandinavian Journal of Psychology* 2001; 42: 297–306.
16. Pascual-Leone A, et al. Transcranial magnetic stimulation in cognitive neuroscience – virtual lesion, chronometry and functional connectivity. *Current Opinion in Neurobiology* 2000; 10: 232–7.
17. Moliadze V, et al. Effect of transcranial magnetic stimulation on single-unit activity in the cat primary visual cortex. *Physiology* 2003; 553: 665–79.
18. Goebel R, et al. The constructive nature of vision: direct evidence from functional magnetic resonance imaging studies of apparent motion and motion imagery. *European Journal of Neuroscience* 1998; 10: 1563–73.
19. Kammer T, et al. The influence of current direction on phosphene thresholds evoked by transcranial magnetic stimulation. *Clinical Neurophysiology* 2001; 112: 2015–21.
20. Kammer T, et al. Anisotropy in the visual cortex investigated by neuronavigated transcranial magnetic stimulation. *Neuroimage* 2007; 36: 313–21.
21. Buffoni L, et al. Image processing strategies dedicated to visual cortical stimulators: a survey. *Artificial Organs* 2005; 29(18): 658–64.
22. Vanni S, et al. Multifocal fMRI mapping of visual cortical areas. *Neuroimage* 2005; 27: 95–105.

V. Valiulis, K. Dapšys, O. Rukšėnas

APPLICATION OF TRANSCRANIAL MAGNETIC STIMULATION (TMS) IN VISUAL CORTEX STUDIES

Summary

The article includes a review of visual cortex studies using transcranial magnetic stimulation (TMS). Main focus is concentrated on induced by magnetic stimulation phosphenes and scotomas as well as their functional relationship. It is noted that phosphene phenomenon is dependent on several brain areas, ranging from V1 area in the primary visual cortex to higher areas, including V2, white matter tracts and other occipital segments. Analysis involves different brain areas relationship to complex phosphene traits: form, colour, texture, topography. Taken into account the development of TMS devices in accuracy and the control of external variables influencing the excitability of visual cortex, new means are suggested to analyse the functional properties of different visual cortex areas and their relationship to subjective phosphene and scotoma traits.

Keywords: transcranial magnetic stimulation, TMS, visual cortex, V1, V2, phosphenes, scotomas.