

Zvezdan Pirtošek

Medicinska fakulteta Univerze v Ljubljani

Možgani, nevrotehnologija in etika

V članku opisujemo genetsko-evolucijske in civilizacijske mehanizme, ki ves čas, a na različnih časovnih skalah, spreminjajo zgradbo in delovanje možganov. V zadnjih tisočletjih postaja nevroplastičnost vse pomembnejši mehanizem hitrejših adaptacij, zlasti ob velikih tehnoloških in kulturnih prebojih (iznajdba pisave, internet), in vodi do reorganizacije možganskih struktur in novega uma. Uvedba novih nevrotehnologij, s katerimi lahko še bolj dramatično in hipno spreminjamo možganske funkcije v bolezni in zdravju in ki nam že omogočajo interakcijo med možgani in računalnikom, pa človeka postavlja pred velika vprašanja bistva in nadaljnjega razvoja in usode človeka. Prav zato se kot imperativ postavlja potreba po novi etiki, ki mora (pro)aktivno sooblikovati dostikrat nejasno mejo med znanjem možnega in modro uporabo le-tega, morda v duhu *recta ratio speculabilium*, *recta ratio agibilium*.

Ključne besede: možgani, nevroplastičnost, nevrotehnologija, internet, etika

Nevroplastičnost med empiricizmom in racionalizmom

Človeško iskanje resnice in znanja je tisočletja zaznamovala dihotomija med empiričnim in racionalnim. Dileme se je na svojstven način dotaknila in jo delno razrešila sodobna nevroznanost. Nevrologija je večji del dvajsetega stoletja možgane razlagala kot okamenel organ, kjer nove možganske celice – kakor je trdil ugledni nevropatolog, prejemnik Nobelove nagrade, Ramon y Cajal – ne nastajajo. Nekateri znanstveniki so se temu sicer upirali in poudarjali plastičnost možganov (William James je v svojem monumentalnem delu *Principles of Psychology* (1890) poudarjal, da je živčevje izrazito plastično, in mladi nevrolog Sigmund Freud je v svojem nikoli objavljenem delu *Načrt za znanstveno psihologijo* menil, da se povezave med nevroni lahko spreminjajo glede na izkušnjo), a šele konec stoletja so z raziskavami prišli namigi (Paul in sodelavci, 1972) in nato nedvoumni dokazi (Kandel, 2006), da se možganske celice porajajo celo življenje in stiki med njimi vzpostavljajo ob novih izkušnjah.

Na ta način je nevrologija vzpostavila komplementarnost med empiricizmom in racionalizmom: genska zasnova, osnovna struktura možganov ter grobe povezave med možganskimi predeli so kantovsko vrojene, sinaptične povezave med nevroni pa se rojevajo in ugašajo z izkušnjami in lockovsko oblikujejo in preoblikujejo

um in možgane. Nevroplastičnost ni prisotna le med sinapsami utrjenih sistemov, ki jih zavestno aktiviramo (npr. spomin v hipokampusu). Je avtomatična in podzavedna, po potrebi se vzpostavi tudi med sicer oddaljenimi in različnimi možganskimi sistemi: pri človeku, ki oslepi, se v asociacijske vidne predele možganov vrastejo slušni nevroni, ali – ko se nauči Braillove pisave – nevroni za dotik. Pri oglušelih se aktivira tisti del možganov, ki procesira dražljaje z obrob-nih predelov vidnega polja in omogoči, da ne-slišano zajamejo z vidom. Pri londonskih taksistih so našli relativno povečan zadnji del hipokampusa (pomemben za prostorsko reprezentacijo), morda na račun sprednjega dela (Maguire in sodelavci, 2000). Nevroplastičnost je prisotna ves čas in povsod, vznikne lahko v urah ali dnevih. Nekatere raziskave descartovsko nakazujejo, da je za nevroplastične spremembe v možganih dovolj že sama predstava aktivnosti ali misel na motorično akcijo (npr. igranje klavirja; gl. Pascual-Leone in sodelavci, 1995). Študija iz leta 2009 je pokazala, da se ob branju zgodbe aktivirajo vsebini pripovedi ustrezni deli možganov – včasih kognitivni, drugič motorični ali senzorični predeli (Speer in sodelavci, 2009).

A nevroplastičnost v evoluciji človeku prinaša dobro in zlo. Osvobaja ga spon genetskega in strukturnega determinizma in odpira vrata svobodni volji, omogoča mu, da se vse življenje uči, popravlja napake, postavlja hipoteze, opaža, si pomembno zapisuje v spomin in po potrebi ta spomin briše. Omogoča razvoj novih farmakoloških in nefarmakoloških terapevtskih pristopov za najrazličnejše bolezni. Po drugi strani pa lahko – s ponavljanimi in vse močnejšimi vzpostavitvami sinaptičnih povezav – prej novo aktivnost spremeni v rigidno navado, potrebo, prisilno misel (obsesijo), dejanje (kompulzijo) ali odvisnost.

Možgani med geni, evolucijo in nevroplastičnostjo

Učinek nevroplastičnih sprememb v zgradbi in delovanju možganov pa lahko opazujemo tudi skozi prizmo razvoja civilizacije, ne samo našega individualnega življenja. To velja še posebej v obdobjih velikih tehnoloških in kognitivnih prebojev. Milijone let je možgane naših prednikov oblikovala evolucija – postopne genetske spremembe kot prilagoditev na nove izzive v okolju. V zadnjih treh milijonih let so se možgani hitro povečevali, vsaj delno sta za to odgovorna gena *microcefalina* in *ASPM*, ki regulirata rast možganov in ki še vedno usmerjata evolucijo tega organa. A ti vse večji možgani niso bili zmožni večjega kognitivnega preskoka. Milijone let je naš prednik hodil po afriških planjavah, vse bolj vzravnano, s preprostim kamnitim orodjem, ki ga je v stotisočih letih malenkostno izboljševal, in v komunikacijsko vse bolj povezani skupini. V zadnjih nekaj sto tisoč letih je verjetno prišlo do genetskih sprememb, ki so v možgane naših prednikov vgradile sposobnost razumevanja načina razmišljanja soljudi, razumevanja njihovih vokalizacij (v temporalnem režnju) in motorično izražanje, vokaliziranje lastnih

misli (v frontalnem režnju). Kdaj natančno je človek ali njegov prednik spregovoril, ne vemo.

A do pravega rojstva uma je prišlo šele pred približno štirideset tisoč leti. Takrat se je pojavila nova varianta gena mikrocefalina, a natančnih vzrokov tega nenadnega kognitivnega »velikega poka« ne poznamo; takrat človek prične na stene paleolitskih jam odtiskovati svoje z okro premazane dlani; risati in iz gline oblikovati podobe živali in ljudi; z noto dostojanstva, reminiscence in vere pokopavati in častiti umrle. Takrat nekako se ob komaj opaznih evolucijskih genetskih spremembah začnejo v možganih z vrtočlavo hitrostjo razvijati mehanizmi, ki omogočajo hitre spremembe, opazne skozi nekaj generacij ali pa že v življenju posameznika. Nov preskok se s prvimi civilizacijami pojavi pred približno 7000 leti (v času, ko se pojavi tudi nova varianta gena ASPM), ko vzniknejo sposobnosti zapisovanja, računanja, branja, merjenja časa, kartografskih predstav. Vse te pridobitve so bile odkrite v zadnjih nekaj tisoč letih in vsak otrok se jih mora naučiti znova; za razliko od govora, ki se je strukturiral in oblikoval skozi dolga obdobja evolucije, verjetno s postopnimi mutacijami genov in spremembami možganske strukture, in ki v otroku samo čaka, da bo – s poslušanjem – nekega dne spontano odkrit. Cerebralna osnova teh novih, relativno hitrih sprememb, je v veliki meri nevroplastičnost.

A tudi te civilizacijske (v nekem smislu »neevolucijske«) sposobnosti zapisovanja, računanja, branja, merjenja časa, kartografskih predstav se razvijajo skozi več stopenj, in na vsaki stopnji je potrebna prilagoditev možganov; včasih zgolj okrepitev obstoječih sinaps, včasih vzpostavitev novih; drugič spet povezave prej slabo ali nepovezanih predelov možganov. Grobo strukturno v zadnjih nekaj tisoč letih možgani ostajajo sicer v glavnem enaki (so se pa, začuda, v zadnjih nekaj deset tisoč letih zmanjšali za približno 10%), a opisane prilagoditve lahko dokažemo z novejšimi, bolj natančnimi slikovnimi in elektrofiziološkimi metodami: možgani nepismenih se tako razlikujejo od možganov pismenih ljudi (Ostrosky-Solís in sodelavci, 2004); angleško govorečih od italijansko govorečih (Paulesu in sodelavci, 2001).

Prostorska predstava sveta se v zori civilizacij začne s primitivno, perceptivno konkretno risbo tega, kar vidimo; brez perspektive, objektivnih razdalj in razmerij. Tisoči let bodo minili, da bo zemljevid z uporabo kompasov in drugih zapletenih merilnih naprav postal natančna, a abstraktna podoba pokrajine. *Občutenje časa* se prične kot linearen ali ciklični tok, ki ga je bilo moč opazovati s potjo planetov in s sončnimi, peščenimi ali vodnimi urami. Šele ko Cerkev v poznem srednjem veku zapove čaščenje boga ob točno določenih časih, ob vsaki uri zadonijo cerkveni zvonovi, v stolpih mestnih hiš pa ob vrtenju mehaničnih kazalcev zakikirikajo petelini in se zavrtijo svetniki. *Pisava* se rodi v rodovitnem predelu med Evfratom in Tigrisom pred več kot pet tisoč leti in pomeni eno največjih revolucij v razvoju civilizacije. Znakovno se je razvijala skozi več stopenj: od pre-

prostih znakov, vtisnjenih v glinasto ploščico, preko logogramov in hieroglifov na papirusu, ki so jih razumeli le izbranci, do feničanskih in grških fonetičnih znakov, sprva zapisovanih brez presledkov (*scriptura continua*).

Prehod od oralnega k pismenem je radikalno spremenil način razmišljanja in s tem strukturo in delovanje možganov. Mentalni svet oralne komunikacije, zasidrane v individualnem in kolektivnem spominu, ritmične in metrično elokventne, recitativne, emocionalno poudarjene in v skupnost zazrte, se je z razvojem pismenosti razvil v novo zavest, manj odvisno od spomina, bolj racionalno in premišljeno, razčlenjeno, a tudi bolj zasebno in individualno. Ure in merjenje časa pričnejo urejevati nov ritem dela, zabave in počitka, v um pa vnašati potrebo po natančnosti, odmerjanju, metodičnosti; ritmi hipotalamusa se usklajujejo s potrebami prefrontalnega režnja. Rojeva se bolj znanstveno-metodičen um. Čitanje zemljevidov okrepi sivo substanco v zadnjem delu hipokampusu. Računanje okrepi povezave med predeli, s katerimi zaznavamo, ločujemo in poimenujemo prste (*angularni girus*) s predeli v frontalnem režnju, ki omogočajo abstraktno razmišljanje. Zapis prvega semantičnega znaka na glinasto ploščico že vzpostavlja bolj trdno povezavo med vidno in semantično skorjo, odgovorno za konceptualno procesiranje. Uvajanje na stotine hieroglifov zahteva dodatno sodelovanje predelov za spomin, prostorsko analizo in odločanje, saj je pomen znaka odvisen od konteksta. Pogled na ideogram, piktogram, črko, hieroglif pa zadnjih 5000 let avtomatično sproži aktivnost predela možganov med okcipitalnim in temporalnim režnjem, nekoč v evoluciji namenjenega za prepoznavanje linij, (pre)križanj, kotov, tistih vidnih elementov, na katere smo v okolju morali biti posebej pozorni. Ta predel možganov se aktivira ne glede na obliko, velikost, font, in znake prepoznamo kot zapisan jezikovni znak.

Na splošno je s časom opazen premik aktivnosti iz predelov možganov, ki svet dojemajo konkretno, senzorično, skupnostno, proti tistim predelom, ki so povezani z abstraktnim razmišljanjem, višjo kognicijo, virtualnostjo, individualnostjo. A potrebno je poudariti, da se včasih zgodi tudi obratno. Tak primer je prehod od kompleksnih logogramov in hieroglifov na zgolj 24 fonetičnih znakov grškega alfabeta, ki vodi do določene »razbremenitve«, zahteva manj spominskega napora in uvaja bolj preprosto senzorično procesiranje. Taka senzorična razbremenitev pa lahko omogoči večjo učinkovitost drugih možganskih procesov – npr. usmerjene pozornosti. Usmerjena in poglobljena pozornost je namreč energetsko posebej zahtevna, saj je za človeka bolj prirodna in evolucijsko razumljiva razpršena pozornost, s katero nadzoruje predvsem za preživetje pomembne spremembe v okoljskih senzoričnih vzorcih.

Vse spremembe, zlasti pa in posebej tehnološke revolucije in dosežki, preko mehanizmov nevroplastičnosti spreminjajo delovanje možganov in naše razumevanje sveta. A vendar te spremembe ne vodijo v popolnoma novo, niso izključujoče, nepovratne in absolutne. Večinoma gre prej za dopolnjevanje, za novo zmožnost

ob ohranjanju ali modificiranju starejše. S prvimi zapisi si je človek razprl nov svet in novo zavest – a s staro oralno tradicijo ne prekine. Tudi v sodobnem svetu ostaja in uživa v svetu razgovorov, posluša predavanja, pridige, hodi v gledališče. Ob zapisovanju svojih spominov na kamen ali papirus – v nasprotju s tem, kar je napovedoval Sokrat v Fajdrosu – ni izgubil svojih spominskih zmožnosti. Ob vzniku poglobljene, usmerjene pozornosti ni izgubil zmožnosti razpršene, hitro se pretakajoče pozornosti in jo je kaj hitro reaktiviral ob vzniku interneta.

Ta sposobnost dodajanja novih zmožnosti ob ohranjanju starih je del evolucije in fiziologije možganov. Nove zmožnosti pogosto nastajajo tako, da evolucija ohrani starejši del možganov in tudi njegovo funkcijo, a nadenj v milijonih let naloži nov sloj možganovine, ki prinaša nove zmožnosti. Včasih – zlasti ob pritisku tehnoloških in civilizacijskih sprememb – pa ne gradi novih možganskih delov, ampak za novost uporabi starejši del možganov, zlasti, če je nova funkcija na nek način povezana s starejšo (primer je prej opisani predel za avtomatično prepoznavo črk v možganski skorji, ki sicer prepozna pomembne linije, obris, nagibe, kote).

Možgani in digitalni mediji

Nekaj tisoč let po iznajdbi zapisovanja črk in števil se soočamo z novim tehnološkim preskokom, ki že v veliki meri spreminja in dopolnjuje naše mentalne funkcije. Gre za razvoj digitalnih medijev, zlasti interneta. Brskanje po internetu nas zasipa z obiljem delno paralelnih in delno izmenjujočih in hitro spreminjajočih se vidnih in slušnih dražljajev, klikanje, uporaba tipkovnic in mišk pa ustvarja drugačne somatosenzorične in proprioceptivne vzorce. Internet aktivira predvsem deljeno, razpršeno pozornost, izvršilne funkcije, procese odločanja in izbire. Reorganizirajo se spomin in procesi učenja. Manj je poudarka na osvajanju in zadrževanju dejstev, manj je poudarka na učenju na pamet. Semantične in epizodične spomine ter znanje o dejstvih vse bolj predajamo »zunanjim izvajalcem«, bolj pa postaja pomembna sposobnost iskanja informacij in fluidnega vzdrževanja informacij (delovni spomin), ki nam omogoča, da v svetu instantnega dostopa do nešteti informacij plujemo k tistemu, kar iščemo. Internet krepi predvsem bolj površno, razpršeno pozornost, ki je sicer pri človeku bolj »prirodno« stanje, saj skozi evolucijo omogoča hitre preskoke pozornosti na tiste senzorične dražljaje, ki se spreminjajo in so morebitno pomembni za beg ali boj. Senzoričnih dražljajev, ki se ne spreminjajo, sčasoma skoraj ne opazimo več (Kandel, 2006). Vendar nam kot vrsti tudi vzdrževana pozornost ni tuja. Med lovom je včasih najbolj koristno tiho, vztrajno in poglobljeno opazovanje.

Z internetom si izgrajujemo možnosti drugega sveta. Ob še vedno ne izgubljenem starem svetu poglobljenih doživetij smo vse bolj sposobni tudi sicer bolj površinskega, a hitrega in izjemno širokega pridobivanja informacij.

Raziskave so jasno pokazale, da uporaba interneta že v nekaj dneh spremeni delovanje možganov. Small in sodelavci (2009) so slikali možgane preiskovancev, ki so redno brskali po internetu, in tistih, ki interneta niso uporabljali. Pri uporabnikih interneta so se aktivirali širši predeli možganov, zlasti pa evolucijsko najmlajši predel možganov, dorzolateralni prefrontalni korteks leve poloble, povezan s procesi odločanja, kratkoročnega delovnega spomina, vrednotenja in reševanja problemov. V drugem delu študije so preiskovance, ki niso imeli izkušenj z internetom, šest dni po eno uro na dan uvajali v internet. V tem kratkem času se je tudi pri tej skupini pojavila izrazita aktivnost levega dorzolateralnega predela.

Te študije dokazujejo, kar intuitivno že vemo: internet, nov digitalni medij, razvija poudarek na nekoliko drugačnih mentalnih funkcijah kot starejši mediji, npr. časopis ali knjiga. Vprašanje pa je, če s tem nepovratno izgubljam tiste sposobnosti, ki so tako značilne za čitanje knjig – sposobnost dolgoročnega spomina, pomnjenja dejstev, usmerjeno pozornost in poglobljeno razumevanje. Zaenkrat se zdi, da temu ni tako. V skladu z biologijo nevropastičnosti se lahko kaj hitro vzpostavijo starejše nevrološke poti, ko in če jih potrebujemo. Če smo preplavljeni z dražljaji, jih lahko zavestno filtriramo (v veliki meri jih sicer filtrira že fiziologija receptorjev). Ni znakov, da bi zaradi uporabe interneta, kot bi lahko sklepali iz naslova popularne knjige (Spitzer, 2012), postajali dementni. Tudi *multitasking* fiziološko ni mogoč: možgani ne morejo sočasno procesirati večjega števila aktivnosti, lahko le zelo hitro menjajo pozornost med eno in drugo dejavnostjo – velikokrat na račun učinkovitosti. Obstaja pa – bolj kot doslej – nevarnost odvisnosti od interneta.

Tudi danes se z vznikom novih nevrotehnologij nahajamo med dvema tehnološkima svetovoma. Izkušnje nas učijo, da je skozi zgodovino človek bil sposoben zadržati najboljše od starega, sprejeti dobro novega in zavreči ali omejiti slabo novega. Res pa je tudi, da je izziv nove digitalne tehnologije drugačen in močnejši kot v preteklosti. Digitalni svet, v katerega smo vstopili, je izrazito dvosmeren: daje nam informacije, a z informacijami ga oblikujemo tudi mi sami in preko njega spletno socialne mreže. Širi se z vrtoglavo hitrostjo in človek preživi vse več časa v interakciji z digitalnimi mediji. Ob vsaki tehnološki revoluciji se nekoliko spremeni in dopolni tudi etika. Dostikrat ta etična dimenzija v svojem času ostaja nevidna in neizrečena; drugič je spet preveč apokaliptična (novost nas bo pokopala) ali pretirano optimistična (novost služi človeku in nanj ne bo vplivala); po pravilu pa je kot zelo pomembna prepoznana (še) v vzratnem zrcalu zgodovine.

Redkokdaj se je v zgodovini človeštva pokazala tako akutna potreba po odgovornosti in po etiki, kot smo ji priča danes, v dobi mogočne nevroznanosti in mogočnih nevrotehnologij. Po eni strani je to zato, ker je stopnja našega (samo)zavedanja višja kot kadarkoli prej v zgodovini, in po drugi, ker ravno digital-

na tehnologija in njene neslutene možnosti odpirajo temeljna vprašanja naše bodočnosti kot človeške vrste.

Možgani v dobi visokih tehnologij

A če je v zadnjih milijonih let možgane in sposobnosti človeka in njegovih prednikov relativno počasi spreminjala evolucija, klimatske in genetske spremembe, v zadnjih nekaj tisoč letih pa preko nevroplastičnosti tudi hitro razvijajoče se civilizacijske pridobitve, smo danes soočeni s spremembo druge vrste in večjim izzivom: nesluten razvoj nevroznanosti, računalniških nevrotehnologij in umetne inteligence omogoča dramatične, včasih izjemno hitre spremembe in razvoj novih, doslej neslutelih zmožnosti. Človekova usoda je iz spon genetike in evolucije v veliki meri prešla v njegove lastne roke.

Hiter vzpon nevroznanosti, nevrofarmakologije in nevrotehnologij odraža delno silovit razmah računalništva in elektronike v zadnji tretjini prejšnjega stoletja, delno pa zavestno spoznanje politikov, da bo nova veda o možganih v veliki meri določila razvoj človeka in družbe. Tako je predsednik Obama leta 2013 lansiral velik in drag projekt *U.S. BRAIN Initiative (Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies)*, Evropska komisija pa istega leta *Human Brain Project*. Oba sta vzpodbudila raziskave možganov in uvedbo novih nevrotehnologij, ki so sicer v veliki meri izhajale iz potreb medicine. Danes lahko bolj zanesljivo in bolj zgodaj odkrijemo pravo diagnozo ter identificiramo biološke označevalce (biomarkerje), s katerimi lahko zasledimo zasevke bolezni, še preden bolnik ali zdravnik opazita prve klinične znake ali simptome. Odpirajo se neslutene možnosti za zdravljenje nevroloških in psihiatričnih bolezni. Z drobnimi elektrodami v možganih ali na površini lobanje lahko merimo možgansko aktivnost, jo spreminjamo in preko te aktivnosti upravljamo s telesom in okoljem. Sodobne slikovne metode omogočajo študij podrobne strukture možganov in zarisovanje možganskega zemljevida za posamezne funkcije.

Obenem pa nevrotehnologije vse bolj široko odpirajo vrata tudi v razumevanje bolj temeljnih mehanizmov delovanja možganov in vedenjskih značilnosti. Raziskave na tem področju se s področja medicine hitro širijo na druga področja: vojsko, ekonomijo, načrtovanje okolja in pametnih mest. Nevroznanstveniki odkrivajo možne odgovore na vprašanja, o katerih je znanost tisočletja lahko le ugibala, saj so možgani zaradi svoje nepristopnosti ostajali najmanj raziskan organ. V zadnjih desetih letih smo v veliki meri pričeli razumeti, kaj je spomin, kaj pozornost, kako se generira hoteni ali avtomatični gib, kaj je fiziološka in anatomska osnova čustev, raziskovali smo možne mehanizme svobodne volje ali njeno morebitno odsotnost. In s temi spoznanji je prišla možnost, da popravimo tudi nekatere manjše, še fiziološke pomanjkljivosti telesa in uma in da okrepimo nekatere sicer normalne funkcije (npr. koncentracijo ali učenje). Z izrazom »kognitivno

žlahtnjenje« ali »kognitivno krepitev« opisujemo katerokoli od številnih farmakoloških ali instrumentalnih metod, ki izostri, okrepi, pospeši katero od možganskih funkcij.

Nove možnosti (podobno kot ob rojstvu pisave ali interneta) seveda spreminjajo in preoblikujejo naše možganske funkcije, naš um, a tudi interakcijo z drugimi ljudmi in s fizičnim okoljem. Povzročajo tektonske spremembe v družbi 21. stoletja.

Med boleznijo, žlahtnjenjem in »novim normalnim«: farmakologija

Že od samih začetkov nevrozanosti smo skušali znanje o možganih uporabiti predvsem kot pomoč ljudem v bolezni. V minulih stoletjih so bile v ospredju farmakološke intervencije, v zadnjih desetletjih neinvazivne in invazivne stimulacije možganov, v zadnjih letih pa vzpostavljanje vmesnikov med možgani in računalniki.

V 19. stoletju je bila razširjena uporaba kokaina, ki so ga v Prusiji načrtno dajali svojim vojakom, v 20. stoletju uporaba kofeina, nikotina, metilfenidata, propranolola, modafinila, v zadnjem času pa potekajo raziskave z oksitocinom in nizkimi odmerki halucinogenov. K farmakološkemu žlahtnjenju možganskih funkcij se zateka veliko ljudi in že leta 2008 je neformalna anketa med bralci revije *Nature* odkrila, da jih 20% uporablja kognitivna krepitvena zdravila, in njihova uporaba vsako leto v razvitih deželah narašča (Maher, 2008).

Modafinil v medicini uporabljamo pri motnjah s pretirano ali nepričakovano zaspanostjo (narkolepsija, hipersomnije). Natančen mehanizem delovanja substance ni znan, delno pa ga pripisujemo zvišani koncentraciji dopamina. Zdravilo poglubi ter podaljša budno stanje, lahko tudi do 60 ali 80 ur. Pri sicer zdravih preiskovancih modafinil lahko izboljša izvršilne funkcije, kognitivno fleksibilnost, načrtovanje in v kombinaciji s kognitivnim treningom za približno 30% izboljšuje proces učenja (Gilleen in sodelavci, 2014).

Metilfenidat je psihostimulant, ki zvišuje raven dopamina in norepinefrina. Pogosto ga predpisujemo pri narkolepsiji in pri motnji z moteno pozornostjo in hiperaktivnostjo (sindrom ADHD).

Propranolol je beta blokator, zdravilo proti visokemu krvnemu pritisku, ki pa zmanjšuje tudi anksioznost, otopi afekt in slabi spomin. Zato ga v medicini uporabljajo za prekinitev začaranega kroga pogojenih fobij, kjer že sam spomin ali misel na stresen dogodek ali objekt (npr. strah pred letenjem, pajki) vzbudi enako burno reakcijo kot dogodek sam. To zdravilo selektivno oslabi konsolidacijo spomina povezanega s strahom, ne pa običajnega deklarativnega spomina (Kindt in sodelavci, 2009), in ga zato uporabljamo tudi za zdravljenje postravmatske stresne motnje. Mnogi sicer zdravi ljudje jemljejo propranolol za pomiritev in

ublažitev napetosti in treme. Simon Tedeschi je v zanimivem zapisu »priznal« na-
črtno uživanje tega »dopinga« pred koncerti in opisal zelo razširjeno uporabo
propranolola med izvajalci klasične glasbe.

Oxitocin je hormon, ki se izloča v možganih ob in po porodu, zlasti v obdobju do-
jenja in vzpostavljanja tesnega stika med otrokom in materjo. Povezan je z večjo
zaupljivostjo, prosocialnostjo in njegov učinek preskušajo v stanjih kot sta avti-
zem in socialna anksioznost. Raziskovalci so z aplikacijo oksitocina v preisko-
vancih vzbudili večje zaupanje do tujcev in dosegli, da so dobrodelnim organiza-
cijam donirali višje vsote (van Ijzendoorn in sodelavci, 2011).

Sicer pa tudi pri zdravlilih, ki jih ljudje ne uporabljajo za krepitev kognitivnih
funkcij, odkrivamo do zdaj manj opazne spremljevalne učinke, kot npr. blago
spremenjeno moralno kognicijo ali občutek za empatijo. Pri bolnikih, ki jemljejo
antidepresiv (selektivni zaviralec privzema serotonina), in tistih s Parkinsonovo
boleznijo, ki jemljejo prekursor dopamina (levodopo), se kaže po uvedbi terapije
motnja moralne kognicije: pri prvih se nekoliko zniža in pri drugih zviša stopnja
egoizma. Tako ugotovljen selektivni učinek serotonina in dopamina bo potencial-
no moč uporabiti pri socialnih disfunkcijah, ki so opisane kot ena od značilnosti
in tudi kot dejavnik tveganja pri mnogih psihiatričnih boleznih (Crockett in sode-
lavci, 2015).

Med boleznijo, žlahtnjenjem in »novim normalnim«: možganska stimulacija

Trenutno veliko moč novih nevrotehnologij poosebljajo učinki draženja možga-
nov, ki v zadnjem desetletju postaja rutinska metoda pri zdravljenju mnogih bole-
zni. Že stari Egipčani so z električnimi ribami zdravili epilepsijo in nekatere du-
ševne motnje, iz starega Rima pa je znana zgodba, ko je zdravnik cesarju Klavdi-
ju neznosen glavobol skušal olajšati tako, da mu je na čelo položil ohlajeno ribo.
Riba je Klavdiju čudežno pomagala; pa ne zaradi učinka hladu na čelu, pač pa za-
radi učinka električnega šoka ribe *Torpedo torpedo*.

V prejšnjem stoletju uvedena in kontroverzna elektrokonvulzivna terapija (EKT,
»elektrošok«) je danes sprejeto in učinkovito zdravljenje za hude in farmakološko
rezistentne oblike depresij. Mehanizem delovanja ni znan, pri tretjini bolnikov se
lahko pojavijo spominske motnje.

Obetajoče in manj kontroveržno je draženje z bolj sodobnimi neinvazivnimi
transkranialnimi (»čez oz. skozi lobanjo«) metodami indukcije električnih tokov v
možganovini, kot so transkranična magnetna stimulacija (TMS), transkranična
stimulacija z enosmernim električnim tokom (ang. *transcranial direct current
stimulation*, tDCS) in transkranična stimulacija z izmeničnim tokom (ang. *trans-
cranial alternating current stimulation*, tACDS). Mehanizem sicer še ni popol-
noma razjasnjen, verjetno pa s stimulacijo induciramo procese podobne dolgo-

trajni krepitvi (ang. *long-term potentiation*, LTP) ali dolgotrajnemu zaviranju (ang. *long-term depression*, LDP), ki potekajo v hipokampusu pri ponavljanem vzpostavljanju sinaptičnih povezav. Stimulacija spreminja tudi koncentracije nevrottransmiterjev, tako inhibitornih gabaergičnih kot ekscitatornih glutamatnih, in vzpodbuja nastanek nevrotropnih faktorjev, ki so ključni za nevroplastične spremembe pri učenju in spominu.

Transkranialna magnetna stimulacija

Pri transkranialni magnetni stimulaciji izrabljamo visokonapetostno magnetno polje, ki nastane v bakreni tuljavi, po kateri teče električni tok v kratkih močnih sunkih in preko lobanje v možganovini inducira tokove, ki so dovolj močni, da povzročijo depolarizacijo živčnih celic do globine 2 cm. Čeprav tudi pri TMS ne poznamo mehanizma, pa se v primerjavi z ECT ta metoda zdi varnejša. Obilno jo uporabljamo za raziskovanje delovanja možganov, saj na neinvaziven način aktivira nevrone pod tuljavo: aktivacija motoričnega predela bo npr. povzročila (ali pa zaustavila) gib, aktivacija vidnega predela vizualne občutke, aktivacija Brocovega jezikovnega področja pa lahko prekine govor. Raziskovalci so ugotovili, da TMS lahko za krajši čas spremeni moralno presojo (Young in sodelavci, 2010). Preiskovance so postavili v situacijo moralnega odločanja – npr., ali naj fant vzpodbudi dekle, da se napoti po nevarnem mostu, s katerega bi lahko padla. Kontrolni preiskovanci so menili, da je to moralno nesprejemljivo, ne glede na to, ali bo dekle padlo ali ne. Za preiskovance, katerih desni temporoparietalni predel (tesno povezan z moralno obarvanimi odločitvami) je bil stimuliran s TMS, pa je bil odločilen izid dogodka (ang. »*no harm, no foul*«). Po draženju desnega TPP so preiskovanci manj upoštevali akterjevo miselno stanje, zlasti v pogojih, ko je načrtovano moralno sprevrženo dejanje (npr. nekomu ponuditi zastrupljen »sladkor«), a je izhod nepričakovano ugoden (v sladkorju ni bilo strupa); moralna perspektiva se torej premakne od deontološke k bolj utilitaristični.

Transkranialna stimulacija z električnim tokom

Transkranialna stimulacija z enosmernim električnim tokom (tDCS) in transkranialna stimulacija z izmeničnim električnim tokom (tACS) pa uporabljata nizke napetosti in majhne tokove.

S tDCS možgansko skorjo dražimo s šibkim polariziranim električnim tokom, ki spreminja električno ravnotežje ionov membrane in mirovni membranski potencial živčne celice. V vrsti študij je tDCS pokazal zmožnost žlahtenja (Meinzer in sodelavci, 2014; Jacobson in sodelavci, 2012), a včasih tudi poslabšanja nekaterih kognitivnih funkcij. Tako je stimulacija posteriornega parietalnega korteksa facilitirala numerično učenje, a okvarila hitrost in zvečala napor (avtomatizem) pri učenju; nasprotno pa je stimulacija dorzolateralnega prefrontalnega korteksa poslabšala učenje, a izboljšala avtomatizem. Taka dvojna disociacija kaže, da tDCS lahko eno kognitivno funkcijo okrepi na račun drugih (Iuculano in Kadosh,

2013). Tehnologija električnega transkranialnega draženja možganov postaja široko dostopna; v namene večje uspešnosti pri video igrar jo je mogoče naročiti tudi po internetu (npr. <http://foc.us/me/#/shop>). Ker pa je zelo poceni, se – z nakupom 9-voltne baterije in stimulacijskih elektrod – uporaba hitro širi v domove tehničnih in nevro entuziastov in laikov. Uporabniki v blogih poročajo, da so uspešnejši pri vrsti dejavnosti, npr. pri sudokuju, raziskovalci pa glede mogočih bolj dolgotrajnih posledicah tovrstnega draženja možganov nimajo niti podatkov niti prepričljivih napovedi.

Invazivne stimulacijske tehnike

Ob neinvazivnih pa so že desetletja v medicini prisotne tudi invazivne stimulacijske tehnike, ki zahtevajo operativno vstavev elektrod na površino ali v globino možganov.

S stimulatorji, vgrajenimi globoko v možgane (globoka možganska stimulacija, GMS), zdravimo Parkinsonovo bolezen, Tourettovo bolezen, tremorje, distonijo, epilepsijo; indikacije za GMS se hitro širijo. Z umetnim kohlearnim implantatom pošiljamo impulze v slušno skorjo gluhih, slepim ljudem pa se vgrajujejo prvi elektronski čipi, ki vzbujajo aktivnost v vidnih poteh živčevja in omogočajo vid. Znanstveniki z univerze Berkeley so poročali o prvih poskusih z izjemno majhnimi milimetrskimi senzorji v velikosti zrnca peska (nevalni prah), ki so jih vgradili v mišice in periferne živce podgan in ki omogočajo brezžično ultrazvočno polnjenje in nadziranje mišične in živčne aktivnosti (Seo in sodelavci, 2016).

Med boleznijo in opazovanjem sanj: slikovne metode

Možgani so ostajali skrivnostni organ tudi zato, ker tehnologija dolgo ni omogočala slikanja tega organa. Šele ob koncu 20. stoletja so se pojavile tehnike, s katerimi lahko dobro prikažemo zgradbo (CT, MRT) ali delovanje (PET) možganov oz. oboje (kombinacija MRT in PET, funkcijska MRT). Tudi tu smo hitro doživeli pomik od pretežno medicinske diagnostične uporabe k poglobljenim raziskavam patofizioloških mehanizmov in k načinom, kako prikazati slikovne korelate možganskih aktivnosti, kot so spomin, pozornost, čitanje, razumevanje in eksekucija govora.

Danes je že mogoče s (sicer še relativno grobo) vizualno rekonstrukcijo ugotoviti, o čem človek razmišlja. V raziskavah so preiskovancem predvajali filme in slikali vzorce njihove možganske aktivnosti. S posebnim algoritmom so nato vzorce teh aktivnosti rekonstruirali v vidno podobo in na ta način odkrili, kaj je preiskovanec gledal (Nishimoto in sodelavci, 2011; Huth in sodelavci, 2016). Japonski znanstveniki so s 60% natančnostjo rekonstruirali kategorije sanjskih podob, ki so jih preiskovanci videli, ko so vstopili v zgodnje stadije spanja (Horikawa in sodelavci, 2013). Wager in sodelavci (2013) so s pomočjo fMRT objektivno prikazali

prisotnost in stopnjo fizične bolečine v *a priori* lokaliziranem bolečinskem omrežju, ki so ga poimenovali NPS (ang. *neurologic pain signature*). V drugi študiji (Woo in sodelavci, 2015) so preiskovance zaprosili, naj poskušajo na bolečino vplivati z mislijo. Preiskovanci so res poročali manj izrazito bolečino, raziskovalci pa opazili aktivacijo povezav med amigdalo in ventromedialnim prefrontalnim korteksom. To je skladno s hipotezo, da na zaznavanje in poročanje o bolečini vplivata dva možganska sistema: nociceptivno/afektivni v NPS in evaluativno-funkcionalni v amigdalo-prefrontalnih povezavah.

Slikovne metode so lahko v veliko pomoč pri bolnikih, ki zaradi kapi ali poškodbe v strateškem delu možganskega debla ne morejo komunicirati z okoljem, in ob sicer normalnih ciklih spanja dajejo vtis popolnega in perzistentnega vegetiranja, pa vendar imajo višje miselne funkcije ohranjene (sindrom vklešenosti, ang. *locked-in syndrome*); takemu bolniku bomo naročili, naj si npr. zamisli obraz svojega zakonca in to sliko bo moč iz možganske aktivnosti rekonstruirati.

Med boleznijo, opazovanjem misli in »novim normalnim«: jutri

Že danes so razvoj in zmožnosti nevrotehnologij osupljivi, čeprav se učinkov ne kot posamezniki ne kot družba ne zavedamo povsem. V naslednjih letih lahko pričakujemo nov kognitivni veliki pok, ki ga lahko zaslutimo in napovemo.

Z razvojem slikovnih tehnik bomo lahko spremljali in tudi shranjevali misli, sanje, predstave, ideje in abstraktne koncepte in spomine, svoje in drugih, spremljali resničnost izjav obtoženih in prič. Vmesniki ne bodo povezovali zgolj možganov posameznika in računalnika, ampak bo mogoča sinhronizirana aktivnost med možgani enega in možgani drugega človeka; še več, mogoče bo vzpostaviti hierarhično urejene paralelne povezave in sinhrono sodelovanje med številnimi možgani in številnimi računalniki. Rezultat bo izjemno izboljšana učinkovitost pri zdravljenju nevroloških bolezni, nesluteno povečanje inteligence in sposobnosti človeškega uma. Znali bomo vzpodbujati usmerjeno nevrogenezo in krepiti ali pa na novo vzpostavljali določene možganske poti ali centre. Analize funkcijskih slik bodo individualizirane in tako izpopolnjene, da bomo lahko napovedovali bodoč razvoj bolezni in sposobnosti, kot so inteligenca, pozornost, akademske zmožnosti. Ameriška raziskovalna agencija (DARPA) dela na projektu »telepatske čelade«, ki bi omogočila tehnološko osnovo za telepatsko komuniciranje med vojaki. Metode stimulacije možganov, kot je TMS, bodo zmožne draženja posameznih možganskih celic. Vmesniki med možgani in računalniki bodo postali kompleksni in dizajnerski, prilagojeni individualnim željam in usklajeni z drugimi tehnologijami, npr. tehnologijo novih virtualnih resničnosti. Široko bodo razširjene nove metode, kot je npr. optogenetika, ki uporablja na svetlobo občutljive beljakovine. Zgolj s prižigom svetlobe bo moč aktivirati ali zmanjšati določena vedenja, npr. agresivnost. Nevralni prah, ki so ga pred kratkim opisali raziskovalci z

Berkeleyja (Seo in sodelavci, 2016), bo izjemno zmanjšan, v obliki mikro ali nano prahu ga bo moč »zasejati« po širnih predelih možganov, nato pa z ustrezno metodo (morda optogenetiko) brezžično aktivirati, ugašati, povezovati znotraj lastnih možganov, z nevrlnim prahom v možganih drugih ljudi, računalnikov in svetovnega spleta.

Med boleznijo, opazovanjem misli in »novim normalnim«: etika, pravo in družba

Razvoj novih nevrotehnologij je nezadržen in izjemno hiter. So vse bolj razširjene in dosegljive, kmalu pa bodo nekatere tudi poceni in umeščene v naš pametni telefon ali, ustrezno pomanjšane, v naše telo. Mnoge bolezni bomo odkrili leta pred prvimi znaki in mnoge bomo zelo učinkovito zdravili. Imeli bomo dostop do širokega znanja, zmožnost globoke in globalne inteligence, mislili bomo hitreje, spretno bomo uporabljali razne vrste pozornosti in spominov, ko in če jih bomo potrebovali. Nadzor naših možganskih in telesnih aktivnosti ter takojšnje povratne informacije nam bodo omogočili optimalne vedenjske vzorce.

A vprašajmo se: je taka tehnologija res v službi človeka? To je možno, a ne samo po sebi razumljivo. Druga možnost je, da je nevrotehnologija reinkarnacija mogočnega demiurga, ki nas usmerja v navidezno negotovo, neznano nam bodočnost, z nepredvidljivimi tveganji, morda proti razvojnim stopnjam, ki presegajo antropocentričnost in se razvijajo v smeri nove evolucijske stopnje, ki presega biološko in kulturno in posega proti transhumani viziji povezanega organskega in neorganskega.

Zato moramo pazljivo prisluhniti vprašanju, ki se porajajo z novo nevrotehnologijo. Bo le-ta vodila v neenakost in socialno-ekonomski prepad med »nevrokognitivno okrepljenimi« in »zgolj zdravimi«? Bo kognitivna krepitev postala sčasoma dolžnost, pričakovanje (kot sta danes cepljenje in fluoriranje vode) in ne svobodna izbira? Bodo lahko država ali delodajalci nadzirali in modificirali naše misli in občutja? Je z elektronskimi čipi dopolnjen jaz še vedno moj izvorni jaz? Lahko pri vojaku uporabimo možgansko stimulacijo, da ne bo o vojni razmišljal v kontekstu morale? Lahko uporabimo pršilo oksitocina, da bo zločinec kriminalistu bolj zaupal in mu razkril zločin? Se lahko od kirurga pričakuje (ali celo zakonsko zahteva?), da se bo pred operacijo javil na električno stimulacijo možganov ali da bo zaužil modafinil, kar mu bo izostrilo pozornost, izboljšalo motoriko in ugodno vplivalo na uspeh operacije (že danes v primeru utrujenosti oblasti v Queenslandu v priporočilih zdravnikom omenjajo 5 – 6 skodelic kave na noč)? Se z jemanjem zdravila, ki otopi afekt in jemlje spominu čustveno ostrino (kot npr. propranolol) v temeljih spreminja naša identiteta in občutek jaza? Je bolj odgovorno do našega telesa, uma, vloge v družbi, da »igramo z dodeljenimi nam kartami«, taki, kakršne nas je ustvarila narava, ali da skušamo telo in um čim bolj izboljšati in okrepiti? Ali naj bomo do jemanja poživila pri študentu ali propranololu

la pri pianistu enako kritični in netolerantni kot do dopinga pri športu? Je meja (ne)sprejemljivega hitrost in intenzivnost sprememb – naj spremenjeno, okrepljeno, žlahtnjeno sposobnost dovolimo, če tempo in intenzivnost sprememb dovolj jeta adaptacijo in integracijo mojega prejšnjega jaza, sicer pa ne?

Trenutno odnos do krepitev kognitivnih sposobnosti sega od fanatičnega entuziazma, preko previdnega optimizma, do skepse in prestrašenega odpora. Neracionalni strah in odpor bo počasi kopnel, zlasti, če bo znanost dokazala, katere metode so varne in učinkovite, politika pa poskrbela, da bodo dostopne vsem. V biologiji človeka je namreč nezadržno stremljenje k več sreče in k večji ustvarjalnosti. A dokler tudi etika in pravo ne bosta rešila žgočih vprašanj, povsem izginil ta strah ne bo nikoli. Skrajni čas je, da se raziskovanje novih tehnologij iz laboratorijev preseli tudi v akademske prostore etikov in pravnikov. Etika v dobi že prisotnih in porajajočih se nevrotehnologij namreč ne sme biti *post hoc* refleksija ali analiza. (Pro)aktivno mora sooblikovati dostikrat nejasno mejo med znanjem možnega in modro uporabo le-tega, morda v duhu *recta ratio speculabilium*, *recta ratio agibilium*.

Brain, Neurotechnology and Ethics

In the article we describe the genetic-evolutionary and civilizational mechanisms that constantly, albeit on different time scales, shape the structure and functions of the brain. In the last millennia neuroplasticity has become an ever more important mechanism for faster adaptations, particularly with the emergence of great technological and cultural breakthroughs (invention of writing, the Internet) leading to the reorganization of brain structures and to a new mind. The introduction of new neurotechnologies which enable us to dramatically and rapidly change our brain functions in health and disease and to create an interface between the brain and a computer challenges humans with big questions on the essence of being human and on further development and destiny. This is precisely why there is an urgent need for a new ethics, which must (pro)actively help in delineating the often-blurred and fuzzy border between the knowledge of what is possible and a wise use of such knowledge, perhaps in the spirit of *recta ratio speculabilium*, *recta ratio agibilium*.

Keywords: brain, neuroplasticity, neurotechnology, the Internet, ethics

Literatura

- Crockett, M. J., Siegel, J. Z., Kurth-Nelson, Z., Ousdal, O. T., Story, G., Frieband, C., Grosse-Rueskamp, J. M., Dayan, P. in Dolan, R. J. (2015). »Dissociable Effects of Serotonin and Dopamine on the Valuation of Harm in Moral Decision Making«. *Current Biology*, 25(14), str. 1852–1859.
- Gilleen, J. P., Michalopoulou, P. G., Reichenberg, A., Drake, R., Wykes, T., Lewis, S. W. in Kapur, S. (2014). »Modafinil combined with cognitive training is associated with improved learning in healthy volunteers--a randomised controlled trial«. *European Neuropsychopharmacology*, 24(4), str. 529–539.
- Horikawa, T., Tamaki, M., Miyawaki, Y. in Kamitani, Y. (2013). »Neural decoding of visual imagery during sleep«. *Science*, 340(6132), str. 639–642.
- Huth, A. G., Lee, T., Nishimoto, S., Bilenko, N.Y., Vu, A.T. in Gallant, J.L. (2016). »Decoding the Semantic Content of Natural Movies from Human Brain Activity«. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 10: 81.eCollection 2016.
- Ijzendoorn, M. H. van, Huffmeijer, R., Alink, L. R., Bakermans-Kranenburg, M. J. in Tops, M. (2011). »The impact of oxytocin administration on charitable donating is moderated by experiences of parental love-withdrawal«. *Frontiers in Psychology*, Oct 13; 2: 258.
- Iuculano, T. in Kadosh, R. C. (2013). »The Mental Cost of Cognitive Enhancement«. *Journal of Neuroscience*, 33(10), str. 4482–4486.
- Jacobson, L, Koslowsky, M. in Lavidor, M. (2012). »tDCS polarity effects in motor and cognitive domains: a meta-analytical review«. *Experimental brain research*, 216, str. 1–10.
- James, W. (1890). *The Principles of Psychology*. New York: Henry Holt and Company.
- Kandel, E. R. (2006). *In search of memory: the emergence of a new science of mind*. New York: W. W. Norton & Company.
- Kindt, M., Soeter, M. in Vervliet, B. (2009). »Beyond extinction: erasing human fear responses and preventing the return of fear«. *Nature Neuroscience*, 12, str. 256–258.
- Maguire, E. A., Gadian, D. G., Johnsrude, I. S., Good, C. D., Ashburner, J., Frackowiak, R. S. J. in Frith, C. D. (2000). »Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers«. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(8), str. 4398–4403.

- Maher, B. (2008). »Poll results: Look who's doping«. *Nature*, 452, str. 674–675.
- Meinzer, M., Jähnigen, S., Copland, D. A., Darkow, R., Grittner, U., Avirame, K., Rodriguez, A. D., Lindenberg, R. in Flöel, A. (2014). »Transcranial direct current stimulation over multiple days improves learning and maintenance of a novel vocabulary«. *Cortex*, 50, str. 137–147.
- Nishimoto, S., Vu, A. T., Naselaris, T., Benjamini, Y., Yu, B. in Gallant, J. L. (2011). »Reconstructing visual experiences from brain activity evoked by natural movies«. *Current Biology*, 21(19), str. 1641–1646.
- Ostrosky-Solis, F., García, M. A. in Pérez, M. (2004). »Can learning to read and write change the brain organization? An electrophysiological study«. *International Journal of Psychology*, 39(1), str. 27–35.
- Pascual-Leone A., Nguyet D., Cohen L.G., Brasil-Neto J. P., Cammarota, A. in Hallett, M. (1995). »Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills«. *Journal of Neurophysiology*, 74(3), str. 1037–1045.
- Paul, R. L., Goodman, H. in Merzenich, M. (1972). »Alterations in mechanoreceptor input to Brodmann's areas 1 and 3 of the postcentral hand area of Macaca mulatta after nerve section and regeneration«. *Brain Research*, 39(1), str. 1–19.
- Paulesu, E., Démonet, J. F., Fazio, F., McCrory, E., Chanoine, V., Brunswick, N., Cappa, S. F., Cossu, G., Habib, M., Frith, C. D. in Frith, U. (2001). »Dyslexia: cultural diversity and biological unity«. *Science*, 291(5511), str. 2165–2167.
- Seo, D., Neely, R. M., Shen, K., Singhal, U., Alon, E., Rabaey, J. M., Carmena, J. M. in Maharbiz, M. M. (2016). »Wireless Recording in the Peripheral Nervous System with Ultrasonic Neural Dust«. *Neuron*, 91(3), str. 529–539.
- Sio, F. S. de, Robichaud, P. in Vincent, N. A. (2014). »Who Should Enhance?: Conceptual and Normative Dimensions of Cognitive Enhancement«. *Humana.Mente – Journal of Philosophical Studies*, 26, str. 179–197.
- Small, G. W., Moody, T. D., Siddarth, P. in Bookheimer, S. Y. (2009). »Your brain on Google: patterns of cerebral activation during internet searching«. *The American Journal of Geriatric Psychiatry*, 17(2), str. 116–126.
- Speer, N. K., Reynolds, J. R., Swallow, K. M., in Jeffrey, M. in Zacks, J. M. (2009). »Reading Stories Activates Neural Representations of Visual and Motor Experiences«. *Psychological Science*, 20(8), str. 989–999.

Spitzer, M. (2012). *Digitale demenz*. München: Droemer.

Young, L., Camprodon, J., Hauser, M., Pascual-Leone, A. in Saxe, R. (2010). »Disruption of the right temporoparietal junction with transcranial magnetic stimulation reduces the role of beliefs in moral judgment«. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, str. 6753–6758.

Wager, T. D., Atlas, L. Y., Lindquist, M. A., Roy, M., Woo, C. W. in Kross, E. (2013). »An fMRI-Based Neurologic Signature of Physical Pain«. *New England Journal of Medicine*, 368(15), str. 1388–1397.

Woo, C. W., Roy, M., Buhle, J. T. in Wager, T. D. (2015). »Distinct Brain Systems Mediate the Effects of Nociceptive Input and Self-Regulation on Pain«. *PLoS Biology*, 13(1):e1002036.

