

UDK 82.0:616.831-073-71

Jurij Bon

Laboratorij za kognitivno nevroznanost, Nevrološka klinika UKC Ljubljana
jure.bon@gmail.com

Urška Perenič

Filozofska fakulteta Univerze v Ljubljani
urska.perenic@gmail.com

EKSPERIMENTALNA UPORABA KVANTITATIVNE ELEKTROENCEFALOGRAFIJE PRI ANALIZI (LITERARNEGA) BRANJA: ČASOVNO-FREKVENČNA ANALIZA

Akad. prof. dr. Francu Zadravcu ob minulem visokem jubileju.

Članek je drugi del prispevka o uporabi EEG metod za namene analize (literarnega) branja. V opreki s tradicionalnimi kognitivnimi teorijami (t. i. modularni model) nove teorije predvidevajo obstoj in sočasno delovanje zelo različnih nevronske mehanizmov, ki omogočajo vzdrževanje reprezentacij (t. i. modeli aktiviranih stanj). Naravi kognitivnih mehanizmov se lahko približamo tudi z uporabo časovno-frekvenčne analize, ki nudi vpogled v vzporedno potekajoče procese z ločevanjem oscilatorne električne aktivnosti možganov na frekvenčna območja. Predvidevajo, da so posamezna frekvenčna območja pomembna za različne vidike kognitivnih mehanizmov, ki so podlaga tudi jezikovni obdelavi pri branju.

Ključne besede: EEG, možganski ritmi (*beta, gama, theta*), časovno-frekvenčna analiza, modeli aktiviranih stanj, [tiho] branje, jezikovna obdelava, kognitivna nevroznanost, empirična literarna znanost (ELZ)

The article is the second part of the survey on the use of the electroencephalographic (EEG) methods in the analysis of (literary) reading. Contrary to prevalent cognitive theories (the so-called modular model) alternative theories supported by emerging brain imaging data presuppose the existence and simultaneous interactions of a number of different representations, supported and maintained by distributed neuronal mechanisms (the so-called activated states model). This question can also be approached by using the time-frequency analysis of EEG data which allows an insight into parallel processing by dividing time course of oscillatory electrical activity of the brain into frequency bands. Individual frequency bands are considered to be important for various aspects of cognitive mechanisms, which are also the basis of language processing in reading.

Keywords: EEG, brain rhythms (*beta, gamma, theta*), time-frequency analysis, activated states models, [silent] reading, language processing, cognitive neuroscience, empirical literary studies (ELW)

II

0 Možganska omrežja in ritmi električne aktivnosti

Vsebina EEG zapisa razen podobnih, ponavljajočih se sprememb električne napetosti na površju glave, na katerih dinamiko vplivajo kognitivni dogodki in se merijo v mikrovoltih, omogoča tudi izračune dinamike kontinuiranih ritmov električne aktivnosti, ki se merijo v nihajih na sekundo (Hz) in se tradicionalno razvrščajo v ločene frekvenčne pasove (počasne *delta* in *theta*, srednje hitre *alfa* in *beta* ter hitre *gamma*). (Teplan 2002) Možganski ritmi kažejo prostorske vzorce, ki so povezani z opravljanjem možganskih funkcij. Pri opravljanju kognitivnih funkcij, kakor so jezikovno procesiranje, spominski procesi in procesi pozornosti, ki so podlaga branju, spremembe znotraj posameznih frekvenčnih območij verjetno odražajo sklopitve delovanja bolj ali manj oddaljenih področij možganske skorje. Omenjeni prostorski vzorci so odvisni od vrste jezikovnega dražljaja (npr. za možgansko obdelavo pomena besede so značilni drugačni nevronske vzorci kakor za obdelavo skladenjskih in fonoloških vrst podatkov).

Sodobne raziskave delovanja možganov trenutno kot najverjetnejšo podpirajo teorijo, da se dražljaji obdelujejo vzporedno v različnih področjih možganske skorje, kar pomeni, da zaznave in spoznave nastanejo tako, da se sodelujoča možganska področja med seboj za kratek čas funkcijsko povežejo (Postle 2015). Domnevajo, da je za tako povezovanje pomembna sinhronizacija ritmične (oscilirajoče) lokalne aktivnosti nevronov (D'Esposito/Postle 2015; Brežan idr. 2004). Tradicionalne teorije kognitivnih procesov so predvidevale, da možgani delujejo po principu združevanja ločenih, jasno opredeljenih specializiranih procesov (Barch 2006). Med najbolj poznanimi **modularnimi** modeli je Baddeleyev model delovnega spomina, ki vključuje štiri ločene procese, specializirane za različne vidike vzdrževanja informacij in manipuliranja z njimi (Repovš/Baddeley 2006).¹ S pomočjo aktivnega delovnega spomina naj bi se kognitivni sistemi, kot so pozornost, zaznavanje in priprava odgovora, povezovali in prilagajali glede na pričakovano in k cilju usmerjeno vedenje.

Razumevanje mehanizmov delovnega spomina in podobno kompleksnih kognitivnih procesov se v zadnjem času močno spreminja zaradi vpeljave novih slikovnih metod, s katerimi merimo možganske aktivnosti. Najpogostejše uporabljena metoda s področja strojnega učenja je multivariatna analiza vzorcev (MVPA), ki omogoča podrobnejše dekodiranje vsebine informacij v možganskih signalih. (Pereira idr. 2009) Medtem ko namreč univariatne statistične analize² signalov zaznavajo relativne razlike v aktivnosti možganskih področij, multivariatne preučujejo celotni vzorec, ki ga

¹ Fonološka zanka je sistem za kratkotrajno vzdrževanje verbalnih dražljajev, analogen sistem za vzdrževanje vidnih in prostorskih informacij se imenuje vidnoprostorska skicirka. Druga dva sistema sta namenjena kompleksnejšim procesom: v vmesnem pomnilniku se shranjujejo multimodalne informacije višjega reda, z vsemi procesi upravlja osrednji izvršitelj. Sisteme so povezovali z aktivnostjo specifičnih področij v možganih.

² V preteklosti so univariatne analize funkcijsko magnetnoresonančnih (fMR) signalov identificirale s kognitivnimi funkcijami povezano aktivnost v delih možganske skorje in globokih področjih (Wager/Smith 2003; Van Snellenberg idr. 2006). To je potrjevalo obstoj specializiranih modularnih možganskih sistemov, ki jih predvideva tudi Baddeleyev model.

tvorijo vsi signali v določenem področju. V zadnjem času so multivariatne metode pokazale, da lahko z istimi procesi povezano aktivnost prepoznamo tudi v signalih iz različnih, glede na tradicionalne poglede nepričakovanih delov možganske skorje.³ (Postle 2015)

Ob novih empiričnih podatkih so ponovno prišle v ospredje teorije, ki namesto modularnih in specializiranih struktur predvidevajo obstoj splošnih mehanizmov za prehodno aktiviranje variabilnih in vzporednih nevronskega omrežij. Za t. i. **modele aktiviranih stanj**⁴ je značilno, da predvidevajo splošno sposobnost možganov, da prehodno, a vzdrževano aktivirajo katerikoli (*sic!*) senzorični, motorični, semantični ali epizodični spominski sistem. (D'Esposito/Postle 2015) To pomeni, da je možen obstoj in sočasno delovanje zelo različnih nevronskega mehanizmov, ki omogočajo vzdrževanje reprezentacij. Usmerjena pozornost je glavni mehanizem, ki omogoča izbiro, aktivacijo in vzdrževanje različnih notranjih reprezentacij iz spominskih sistemov. Semantične informacije v delovnem spominu lahko obstajajo v eni izmed možnih stopenj aktivacije, kar je določeno z intenzivnostjo usmerjanja pozornosti nanje. Glede senzoričnih informacij predvidevajo, da se vzdržujejo prek aktivnosti istih sistemov in reprezentacij, ki so podlaga za njihovo zaznavo. (D'Esposito 2007) Empirični podatki tudi pravijo, da je vzdrževanje senzoričnih informacij povezano s selektivno aktivacijo možganskih področij, odvisno od vrste informacije. Že zgodaj po aktivaciji in vzdrževanju senzoričnih informacij pa se te povežejo tudi z motoričnimi intencami. To razlagajo s tem, da se senzorične informacije prenesejo v širše aktivni sistem, kjer obstajajo kot objekti zaznave in kot tarče potencialne motorične aktivnosti. Če upoštevamo te principe delovanja možganov, se postavlja vprašanje, koliko je sploh še upravičena delitev kognitivnih sistemov na področja pozornosti, motorične intence in vzdrževanja senzoričnih informacij. (D'Esposito/Postle 2015)

1 Časovno-frekvenčna analiza EEG podatkov

EEG podatke, ki nastanejo med izvajanjem kognitivnih nalog, analiziramo na dva komplementarna načina. V prvem članku (Perenič/Bon 2015) predstavljena analiza z dogodki povezanih potencialov (ERP) nam poda celotni vpogled v časovni potek najbolj značilnih komponent povprečenega signala med določenim ponavljajočim se kognitivnim dogodkom. V tem članku predstavljena časovno-frekvenčna analiza pa prek transformacije signala z eno od matematičnih dekompozicijskih metod podaja časovno-frekvenčno matriko, v kateri lahko za isto časovno obdobje spremljamo spremembe moči in faznega zamika frekvenčno ločenih delov signala.

Klasični/aditivni model nastanka ERP komponent predvideva, da te komponente predstavljajo prehodne izbruhe nevronske aktivnosti, ki so časovno poravnani na dogodke v kognitivni nalogi (Sauseng idr. 2007). Aktivnost naj bi izvirala iz enega ali več anatomsko ločenih možganskih izvorov, ki so vpleteni v izvajanje senzoričnih in kognitivnih procesov. Vendar tak pogled na nastanek ERP valov v zadnjem času postaja vprašljiv. Časovno-frekvenčne analize so namreč pokazale, da lahko že

³ Vpletenost teh omrežij prej ni bila poznana.

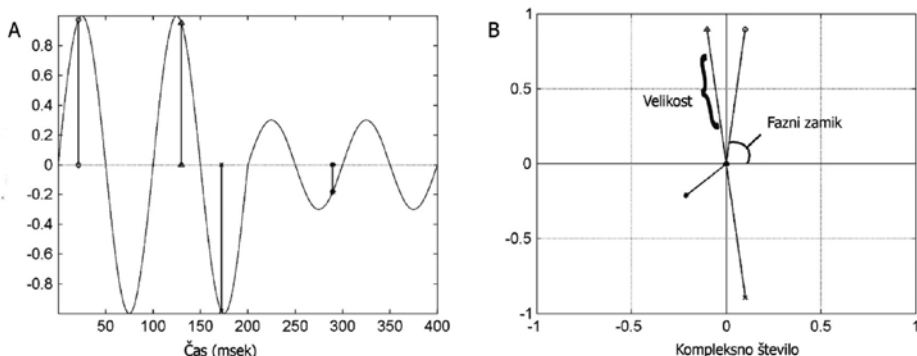
⁴ Ti so torej mišljeni v nasprotju z modularnimi modeli.

v posameznih poskusih eksperimenta zaznamo specifične, z dogodkom povezane spremembe v amplitudi ali fazi EEG oscilatorne aktivnosti v posameznih frekvenčnih območjih. To pomeni, da bi ERP valovi lahko predstavljali prehodna resetiranja faznega zamika oscilacij v velikem številu ločenih nevronske skupkov, ki sistematično nastajajo kot odgovor na dogodke v kognitivni nalogi v poskusu. (Makeig idr. 2002) Ker so fazno sinhronizirani, se obdržijo med procesom povprečenja in postanejo vidni kot ERP valovi, čeprav torej ne odražajo aktivnosti anatomsko ločenih izvorov.⁵

Prednost časovno-frekvenčnih analiz pred klasično ERP analizo je v tem, da zaradi ločevanja oscilatorne aktivnosti na frekvenčna območja nudijo vpogled v vzporedno potekajoče procese, s čimer se lahko bolj približamo naravi kognitivnih mehanizmov (Roach/Mathalon 2008; Luck/Vogel 2013). Oscilatorna aktivnost v možganih sicer nastane takrat, kadar veliko število vzporedno orientiranih nevronov prejme enak vhodni sinaptični signal ali generira enako ponavljajoče se zaporedje akcijskih potencialov. Takrat v zunajceličnem prostoru nastanejo ritmični potenciali lokalnega polja, ki se prenašajo preko telesnih tkiv in izgubljajo moč sorazmerno z oddaljenostjo od svojega izvora. Močnejša polja se torej prenesejo dlje kot šibkejša. Če so dovolj močna in orientirana pravokotno na skalp, jih lahko na površini glave merimo kot EEG signale. To pomeni, da EEG elektrode zaznavajo le aktivnost, ki je že sama po sebi sinhronizirana in zato močnejša od drugih virov električne aktivnosti v možganih. Dodatne podatke o sinhronizaciji nevronske aktivnosti pridobimo s časovno-frekvenčno analizo EEG signala. Izvemo lahko, katere frekvence so najmočnejše v določenih časovnih in prostorskih točkah in kako se časovno in prostorsko sinhronizirajo njihovi fazni zamiki. To da kompleksnejšo sliko sprememb moči EEG signala v povezanosti z dogodkom, ki nas zanima. (Roach/Mathalon 2008)

EEG signal matematično ponazorimo kot skupek sinusnih valovanj z različnimi frekvencami, ki se prepletajo v času in imajo različne fazne zamike glede na konkretni dražljaj, ki je vplival na njihovo dinamiko. Valovanje je definirano s frekvenco, amplitudo in faznim zamikom. Z matematičnimi dekompozicijami, kot npr. z uporabo Morletove valčne funkcije, za vsako izmed točk v časovno-frekvenčnem prostoru izračunamo kompleksna števila, ki vsebujejo podatka o amplitudi in faznem zamiku. S tem pridobimo amplitudne in fazne časovno-frekvenčne matrike. Iz njih lahko izračunamo parametre, ki opisujejo moč oscilacij v frekvencah in njihovo sinhronizacijo na isti elektrodi ali med različnimi elektrodami. S tem lahko ponazorimo različne vidike dinamike električne aktivnosti nevronov in sinhronizacije v omrežju. (Roach/Mathalon 2008)

⁵ Alternativno razlagajo nastanek ERP valov s kombiniranim modelom, ki predvideva, da se poleg faznega resetiranja pojavijo še prehodna povečanja amplitude oscilacij, povezana z dogodki v kognitivni nalogi (Roach/Mathalon 2008).



Slika 1: EEG signal, sestavljen iz množice sinusnih valovanj z različnimi frekvencami, za katere lahko s pomočjo časovno-frekvenčne dekompozicije v vsaki časovni točki določimo velikost in fazni zamik (Roach/Mathalon 2008).

Teoretični modeli električne nevronske aktivnosti ob kognitivnih nalogah predvidevajo, da nevronske reprezentacije elementov, ki se vzdržujejo v delovnem spominu, nastanejo ob dinamičnem združevanju nevronov v nevronske skupke. Združevanje bi lahko potekalo prek mehanizma kroženja signala v vzpostavljenih krožnih zankah ali pa prek lokalne sinhronizacije oscilatorne aktivnosti nevronov. (D'Esposito/Postle 2015) Sočasno, vendar ločeno vzdrževanje večjega števila elementov poteka tako, da nevroni v skupku, ki predstavlja posamezni vzdrževani element, vzdržujejo svojo povezanost s sinhronim skupinskim proženjem. To proženje pa je asinhrono glede na proženje nevronov, ki so združeni v skupke, ki predstavljajo druge elemente. Nevronski skupki nastajajo dinamično, glede na lastnosti elementa, ki ga predstavljajo. Iz računskih simulacij sledi, da aktivnost skupka postopoma upada po vsakem sinhronem proženju, zato je pomembno, da ne preteče preveč časa do naslednjega proženja, ki obnovi povezanost skupka. (Luck/Vogel 2013) Elektrofiziološke raziskave pri ljudeh in primatih kažejo, da je proženje posameznih nevronske skupke povezano z oscilatorno aktivnostjo v frekvenčnem območju *gama* (30–100 Hz), medtem ko razporejanje proženja ločenih skupkov v času omogočata oscilatorni aktivnosti *theta* (4–7 Hz) in *alfa* (8–13 Hz), ki delujeta kot nosilni frekvenci (Luck/Vogel 2013; Roux/Uhlhaas 2014). Vzpostavljjanje skupnega *theta-gama* ali *alfa-gama* kodiranja informacij verjetno nastane z medfrekvenčnim sklapljanjem.

Ugotovili so, da je naraščanje težavnosti kognitivnih procesov parametrično povezano z naraščanjem amplitud oscilacij v vseh frekvenčnih območjih. (Uhlhaas/Singer 2010) Predvidevajo, da so posamezna frekvenčna območja pomembna za različne vidike kognitivnih mehanizmov in procesov. Ritmi *theta* povezujejo s procesi spomina, sinaptične plastičnosti, kognitivnega nadzora in medpodročne kortiko-kortikalne sinhronizacije. Ritmi *alfa* so podobno povezani s procesi kognitivnega nadzora in medpodročne kortiko-kortikalne sinhronizacije, pa tudi s procesi inhibicije, pozornosti in zavesti. Ritmi *beta* povezujejo s senzoričnim filtriranjem, pozornostjo, nadzorom motoričnih aktivnosti in kortiko-kortikalno sinhronizacijo. Ritmi *gama*

so povezani s percepcijo, spominom, pozornostjo, zavestjo in sinaptično plastičnostjo. (Uhlhaas/Singer 2010)

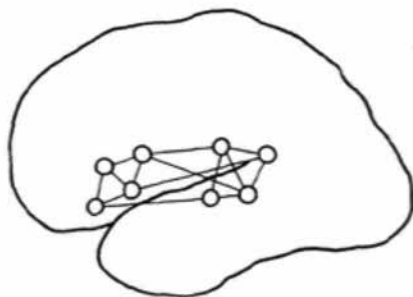
Kot kaže, so ritmi *gama* generični odraz vsebine, ki se trenutno vzdržuje v nevronskih skupkih. Pojavljajo se pri zelo različnih kognitivnih procesih, zaznamo jih lahko v vseh področjih možganske skorje in večini globokih struktur. Ritmi *theta* so verjetno povezani s časovnim razporejanjem elementov, v splošnem pa so bolj kot z vsebino reprezentacij povezani s kontrolnimi mehanizmi delovanja omrežij in se tako pojavljajo v čelni (frontalni) in senčni (temporalni) skorji. Ritmi *alfa* so pomembnejši za vidne oz. sensorimotorične procese, kjer opravljajo nalogo kontrolnih mehanizmov in podpore vzdrževanja informacij (pri verbalnih procesih to nalogo opravljajo ritmi *theta*). Pojavljajo se v možganski skorji, talamičnem jedru in drugih globokih strukturah. Poleg specifične vloge, ki jo imajo pri vzdrževanju elementov v vidnem delovnem spominu, je njihova splošna vloga povezana z inhibicijo za trenutno aktivnost nepomembnih možganskih področij. (Roux idr. 2012; Roux/Uhlhaas 2014)

Za kognitivne procese je poleg oscilatorne aktivnosti pomembna tudi omrežna sinhronizacija lokalnih nevronskih oscilacij. Kognitivne sposobnosti se vzpostavlja jo prek koordinirane aktivnosti razpršenih nevronskih procesov, vzpostavitev teh omrežij pa poteka prek povečanega sklapljanja med nevroni, ki so relevantni za določeno aktivnost, in zmanjševanja vpliva nevronskih skupkov, ki niso pomembni. (Luck/Vogel 2013) Komunikacija znotraj možganskih področij in med njimi poteka v milisekundah in omogoča prehodno združevanje razpršenih nevronskih skupkov v dinamična funkcijska omrežja (Uhlhaas 2013). Veljavnejše zaključke zaenkrat preprečuje dejstvo, da metodološka vprašanja glede analize oscilatorne aktivnosti niso povsem razrešena (Oertel-Knöchel idr. 2011).

Koaktivacijo nevronskih sklopov, ki so porazdeljeni v času in prostoru, pomaga razložiti Hebbovo pravilo o živčnih mrežah, ki sloni na treh predpostavkah, utemeljenih z empiričnimi dokazi (Sejnowski/Tesauro 1989). Prva predpostavka pravi, da se povezave med nevroni možganske skorje, ki so pogosto sočasno aktivni, okrepijo. Po drugi predpostavki sinaptična krepitev poteka tako med sosednjimi kot oddaljenimi nevroni možganske skorje, kar je podprto z nevroanatomskimi študijami. Tretja predpostavka pa pravi, da se bodo povezani nevroni pozneje verjetno prožili skupaj (simultano) in bodo delovali kot funkcionalna celota.

2 Možganska omrežja in jezikovne sposobnosti

F. Pulvermüller postavlja Hebbovo pravilo o živčnih mrežah kot podlago jezikovni obdelavi različnih vidikov besede (leksema), kakor so npr. fonološke lastnosti besede; zaradi močnih notranjih povezav med nevroni pride pri obdelavi fonoloških informacij do aktivacije celotne skupine nevronov, močne povezave med njimi pa zagotavljajo, da se nevronski vzorec ohranja (Pulvermüller 1996: 318).



Slika 2: Skica omrežja, ki predstavlja fonološko obdelavo v možganih (prav tam).

Koncept funkcijskega povezovanja možganskih omrežij je uporaben tudi za razlaganje višjih kognitivnih funkcij, ki so podlaga jezikovni obdelavi pri (literarnem) branju, saj pride do sodelovanja več kognitivnih podsistemov v možganih.⁶ Vendar je nemajhen problem dejstvo, da je področje takih raziskav skorajda nepregledno, zaradi česar je težko izbrati relevantnejše raziskave. Ni povsem jasno, kakšna je dejanska vloga možganskih ritmov in njihovih prostorskih vzorcev pri jezikovnem procesiranju in bralnem razumevanju. Tako kakor je mogoče različne prevladujoče frekvence oz. možganske ritme povezati z istimi kognitivnimi funkcijami, tako je mogoče istim ali podobnim vzorcem možganske aktivnosti pripisati različne kognitivne funkcije. (prim. Weiss/Müller 2012) Ilustrativen primer so v eksperimentih ugotovljena nihanja možganske aktivnosti v frekvenčnem območju *beta* pri obdelavi akcijskih glagolov, saj ni jasno, ali je aktivnost v omenjenem območju spodbujena predvsem s (semantično)spominskimi procesi, v katerih pride tudi do reaktivacije motoričnih reprezentacij telesnih akcij, ki so shranjene v možganih, ali gre predvsem za neposredno vključenost motoričnega podsistema in je prevladujoča frekvenca *beta* rezultat funkcijske sklopitve kognitivnih in motoričnih funkcij.

L. W. Barsalou ob naslonitvi na A. M. Glenberga pri jezikovni obdelavi veliko vlogo pripisuje spominskim procesom. V spominu so shranjeni vzorci telesnih in mentalnih stanj, ki integrirajo vidne, slušne, motorične, afektivne idr. komponente. To pomeni, da so v spominu shranjeni vzorci oz. reprezentacije multimodalne narave. Komponente,⁷ ki tvorijo reprezentacije, se glede na vrsto jezikovnega dražljaja reaktivirajo avtomatično in nezavedno. (Glenberg 1997; Barsalou 2008: 617–23) To kaže ne samo na povezanost različnih vrst možganskih funkcij, ampak je svojevrsten dokaz o obstoju utelešene kognicije. (Psihološke) teorije⁸ utelešene kognicije

⁶ Sodobne raziskave odkrivajo vse večje število funkcijsko ločenih omrežij v možganih, ki najverjetneje podpirajo ločene možganske procese. Za namene naše razlage jih lahko poenostavljeno razdelimo v pet glavnih podsistemov: kognitivni (višji kognitivni procesi), vidni in senzomotorični (integracija vidnih in drugih senzoričnih dražljajev z motoričnimi odgovori), limbični (čustveno procesiranje) in avtonomni (nadzor delovanja perifernih organov v telesu).

⁷ Pri obdelavi akcijskih glagolov se najprej reaktivirajo motorične komponente reprezentacij.

⁸ Množinska oblika zato, ker si avtorji niso enotni v tem, ali imajo telesna stanja vpliv na kognicijo. Nekateri bolj poudarjajo vlogo socialnih interakcij in okolja v spoznavnih procesih (npr. Prinz, Robbins/Aydede). Strinjajo pa se, da je treba kognicijo pojmovati multimodalno, saj so kognitivne funkcije pod

(ang. *Theories of Grounded Cognition*) zavračajo tradicionalne poglede, po katerih so kognitivne funkcije neodvisne od sistemov za percepcijo (vid, sluh) in motoričnih mehanizmov, in pravijo, da so duševne simulacije telesnih in mentalnih stanj (tj. motoričnih, vizualnih, taktilnih; čustvenih, doživljajskih, miselnih), ki so del človekovega izkustva s svetom, pomembne pri oblikovanju kognitivnih mehanizmov in torej predstavljajo osnovo spoznavanja oz. védenja.

Teorije asociativnih nevronske mreže pravijo podobno glede jezikovnih sposobnosti. Besede oz. reprezentacije objektov so v možganih organizirane na način porazdeljenih nevronske sklopov. Po nevronske hibridne modelu (npr. Hart idr. 2013), ki je model delovanja semantičnega spomina, prepoznavanje reprezentacij objektov predpostavlja multíplo aktivacijo več podsistemov, in sicer motoričnega, vizualnega, avditivnega in taktilnega. To pomeni, da pride do sodelovanja funkcij različnih redov. Nekateri avtorji pa v sorodnih kontekstih govorijo o multimodalnosti semantične obdelave v možganih (Stein idr. 1999) ali o kortikalni porazdeljenosti človeških zaznav, za katere so značilne funkcijske sklopitve (Hipp idr. 2011).

3 Jezikovna obdelava in hitri možganski ritmi

3.1 Beta

V kontekstu jezikovne obdelave je izmed možganskih ritmov (naj)bolj zanimiv ritem *beta*, saj je povezan z opravljanjem višjih kognitivnih funkcij. (Za pregled gl. Weiss/Müller 2012.)

3.1.1 V prid stališča o obstoju utelešene kognicije in funkcijske povezanosti motoričnih in kognitivnih funkcij najbolj govorijo raziskave, v katerih so med procesi jezikovne obdelave in razumevanja (besed, stavkov) ugotovili sočasne spremembe v oscilatorni aktivnosti nevronov v motoričnih področjih skorje.

Povezanost motoričnih in kognitivnih funkcij so eksperimentalno raziskovali pri akcijskih glagolih (premikanja, gibanja), in sicer tako pri njihovem tvorjenju kot razumevanju. Zmanjšanje moči v območju frekvenčnega pasu *beta*, ki je bilo predhodno ugotovljeno pri opravljanju motoričnih nalog (npr. naloga premikanja prstov), kaže, da je prišlo pri jezikovnem procesiranju akcijskih glagolov do aktivacije sistema za motoriko. (Hari idr. 1998, Babiloni idr. 2002, Singh idr. 2002; Fisher idr. 2008, Weiss/Müller 2012)

Vprašanje je, v kolikšni meri gre pri s kognicijo povezani aktivaciji motoričnih funkcij za neposredno vključenost motoričnega subsistema in koliko za učinek uspešnega priklica (motoričnih reprezentacij) iz semantičnega spomina. To so skušali preveriti eksperimentalno s primerjavo možganske obdelave dveh vrst akcijskih glagolov. V časovnem oknu pribl. 250 ms po prejemu dražljaju so ugotovili razlike v nevronske aktivnosti nad motoričnimi področji. Pri skupini glagolov, ki pomenijo

vplivom mehanizmov v različnih možganskih področjih. K tem teorijam lahko uvrstimo kognitivne lingvistične teorije, ki pravijo, da so abstraktni pojmi metaforično utemeljeni v utelešenem znanju oz. naših izkustvih, ki jih imamo s telesom, raznovrstnimi življenjskimi situacijami ipd. (npr. Lakoff, Johnson)

premikanje, povezano s spodnjo polovico telesa (z nogami), so opazili zgodnejšo in izrazitejšo aktivnost v tistem delu motoričnega sistema, ki uravnava gibanje nog, pri glagolih, ki se nanašajo na dejanja, povezana z govornimi organi in obraznimi mišicami (npr. *govoriti*), pa na stranskih elektrodah in blizu predela za urnavanje govornih mišic. (Pulvermüller idr. 2001) Rezultati niso nujno v opreki s stališčem o (semantično)spominskih procesih v tem frekvenčnem pasu, o čemer govori tisti del teorij(e) utelešene kognicije, po katerem so glagoli oz. leksemi v možganih shranjeni na način multimodalnih reprezentacij. To bi pomenilo, da je prišlo v konkretnem primeru tudi do reaktivacije motoričnih reprezentacij telesa.

3.1.2 Rezultati druge večje skupine raziskav, ki se ukvarja z možganskimi odzivi pri obdelavi (posameznih) besed v različno širokih kontekstih, aktivnost *beta* ritmov povezujejo z nivojem semantike oz. prepoznavanjem in obdelavo pomenskih lastnosti besednih kategorij. Opravljanje višjih kognitivnih funkcij, kakor so iskanje, obdelava in integriranje informacij na besednopomenski in oblikoslovni ravni, prav tako povezujejo z visokofrekvenčno sinhronizacijo v območju *gama*.

Ilustrativno je eksperimentalno merjenje možganskih odzivov pri jezikovni obdelavi oz. percepciji⁹ besed,¹⁰ ki so lahko vpete v stavek in pripadajo različnim besednim vrstam oz. kategorijam. Primerjalno so se ukvarjali z možganskimi odzivi pri obdelavi samostalnikov in glagolov. Zanimale so jih razlike v nevronskih vzorcih med obdelavo konkretnih in abstraktnih samostalnikov¹¹ in preučevali so odzive pri različnih vrstah glagolov. Največje razlike v nihanjih so bile v frekvenčnih pasovih *beta* in *gama* in kažejo na to, da so hitri ritmi povezani z iskanjem in občutljivi na obdelavo semantičnih in morfoloških lastnosti besede (tj. različnih besednovrstnih kategorij).

V območju pasu *beta* je bila višja stopnja koherence (specifična mera ujemanja aktivnosti med elektrodami) ugotovljena med obdelavo konkretnih in abstraktnih samostalnikov. Največja usklajenost je bila izmerjena na posteriornih elektrodah oz. med levo frontalno in desno posteriorno elektrodo, kar kaže na to, da je sodelovanje med možganskima poloblama (hemisferama) oz. anatomsko bolj oddaljenimi možganskimi področji intenzivnejše pri obdelavi konkretnih samostalnikov, medtem ko se obdelava abstraktnih samostalnikov odraža v lokalnejših sklopitvah nevronov.¹² Dejstvo, da se pri konkretni za kratek čas funkcijsko povežejo bolj oddaljena možganska področja in pride do aktivacije več asociacijskih področij (kakor pri abstraktnih samostalnikih), je v skladu s stališčem, da je konkretna v možganih shranjena na način multimodalnih reprezentacij. Stopnja koherence v območju *beta* je praviloma višja tudi pri obdelavi samostalnikov nasproti glagolom, in sicer v frontalnih predelih. (Schack idr. 1999; Weiss/Müller 2003: 331–33)

⁹ (Psihološki) pojem percepcije je ustreznější od pojmov obdelave in recepcije, saj zajema čutni vidik zaznavanja in dojetja besede. Je v soglasju s stališčem o multimodalnosti reprezentacij, ki so shranjene v možganih, tako da je poudarek na njihovi čutni modalnosti.

¹⁰ Besede v vlogi dražljaja se predvajajo vizualno ali slušno.

¹¹ Podskupino raziskav zanima, kako poteka obdelava osebnih nasproti drugim vrstam lastnih imen.

¹² Pulvermüller idr. (2001) podobno ugotavlja za funkcijske/nepolnopomenske besede nasproti polnompomskim.

Da imajo semantične lastnosti besede in s tem povezani spominski procesi vpliv na vzorce nevronske aktivnosti v visokofrekvenčnih območjih, kaže primer jezikovne naloge, v kateri so morali preiskovanci priklicati zahtevane jezikovne podatke. Nevronska aktivnost v območju *beta* in usklajenost med ustreznimi predeli možganov hkrati kažeta, da je semantični spomin po možganih razpršen in so komponente reprezentacije besede shranjene v različnih predelih.¹³ V enem od eksperimentov sta bili na način (vizualnih) dražljajev posredovani besedi *puščava* in *grba* in preiskovanci so morali pritisniti na gumb, če so ob tem pomislili na *kamelo*. Če je (semantični) priklic uspel, se je to odrazilo v visokofrekvenčni sinhronizaciji v območju ritmov *beta*,¹⁴ in sicer v časovnem oknu pribl. 1100 ms po prikazu dražljajev. Prišlo je tudi do usklajenega delovanja med suplementarnim motoričnim področjem skorje (SMA), predelom globokega možganskega jedra talamusa (pulvinar), ki je pomemben za prevajanje motoričnih in senzoričnih dražljajev v možgansko skorjo (kar je bistvenega pomena za pričetek procesa iskanja), ter zadajšnjimi in senčnimi predeli možganske skorje. Zadnje, tj. aktivacijo in povezovanje vizualnih asociacijskih področij, je mdr. mogoče pojasniti z dejstvom, da so bili v konkretnem primeru udeležencem dražljaji predstavljeni vizualno. V nasprotnem primeru (neprepoznavne dražljajev) pa so bile povezave med talamusom in skorjo izrazito oslABLJENE. (Hart idr. 2013)

3.1.3 Možganske ritme *beta* razen z obdelavo na ravni besednega pomena povezujejo z obdelavo stavčnega pomena oz. obdelavo na ravni skladnje. Bastiaansen in Hagoort (2006) visokofrekvenčno sinhronizacijo v območjih *beta* in *gamma* povezuje z višjimi kognitivnimi operacijami, ko gre za priklic (iz dolgoročnega spomina), obdelavo in povezovanje informacij tako na ravni stavčnega pomena kot strukture stavka.¹⁵

Idejo, da je na ravni možganskih procesov vendarle mogoče razlikovati med procesi na nivoju (stavčne) semantike in skladišne obdelave (npr. Hagoort 2003), so ugotovili že v ERP raziskavah. Nekaj podobnega velja, ko govorimo o obeh vrstah obdelave v povezavi z možganskimi ritmi. Po eni strani je jasno, da se skladišna in semantična obdelava v možganih odvijata vzporedno in v časovnem oknu nekaj sto milisekund od prezentacije dražljaja; aktivirajo se področja v levem frontalno-temporalnem območju. Po drugi strani sta semantična in skladišna obdelava v možganih različni operaciji, kar pomeni, da možgani pri obdelavi stavka funkcijsko ločijo jezikovne operacije na teh dveh ravneh.

V zvezi z jezikovnim procesiranjem na ravni stavka je govor o dveh vrstah procesov. Eno je obdelava na ravni (besednih) pomenov; vključuje obdelavo podatkov, ki jih dobimo na ravni leksikalne enote in so hkrati vpeti v širši kontekst stavka. Drugo

¹³ Med zgodnejšimi študijami k vlogi jezikovnih spominskih procesov, na katere se sklicujeta Weiss/Müller (2003), so Rugg/Venables (1980), Schack idr. (1996; 1999; 2003), Weiss/Rappelsberger (1996, 1998), Rappelsberger idr. (1999), Volč/Razumnikova (1999), Weiss idr. (2000), Weiss/Rappelsberger (2000).

¹⁴ Prav tako *theta*, in sicer v časovnem oknu med 100 in 150 ms po prikaznem dražljaju (Hart idr. 2013).

¹⁵ V angleščini se za procesa semantične in skladišne obdelave uporablja pojem unifikacije/poenotenja, ki pomeni vzporedno obdelavo podatkov na obeh jezikovnih ravneh.

je obdelava na ravni skladišne zgradbe stavka, kjer gre za identifikacijo strukture stavka z razmerji med besedami, kar je pomembno pri pripisovanju pomena izjavi in njenem razumevanju. (Bastiaansen/Hagoort 2006) Za obe vrsti stavčnih operacij velja, da izzoveta hitre možganske ritme, vendar se ločita po nevronske sinhronizaciji v različnih frekvenčnih območjih. Velja, da so možganski ritmi *beta* občutljivejši na obdelavo informacij na skladišni ravni. Natančneje, sinhronizacija v spodnjih frekvencah pasu *beta* (13–18 Hz/10–20 Hz) je povezana z obdelavo na ravni skladnje (t. i. skladišsko poenotenje), obdelava na semantični ravni (t. i. semantično poenotenje) pa praviloma izzove sinhronizacijo v območju pasu *gamma*.

Vzorčen primer za ugotavljanje specifik skladišne obdelave v možganih je jezikovna naloga, v kateri morajo preiskovanci prebrati stavke, ki so pravilni ali pa vsebujejo bodisi semantično bodisi skladišsko napako. Do linearnega naraščanja moči ritmov *beta* pride v poteku stavka v skladišsko pravilnih pogojih (in do funkcijskega povezovanja med frontalno in temporalno nameščenimi elektrodami), medtem ko je ta v stavku s semantično napako (uporaba napačne besedne kategorije) oslABLJENA. Če so napake v stavčni strukturi, pa pride običajno do izničenja učinka.¹⁶ Odtod je mogoče sklepati, da je aktivnost v območju pasu *beta* oz. *beta* 1 (še) bolj kakor s semantično obdelavo povezana s procesiranjem na ravni skladnje. (npr. Bastiaansen idr. 2010; Bastiaansen/Hagoort 2015)

Občutljivost frekvenčnega pasu *beta* 1 na skladišne lastnosti kažejo rezultati eksperimenta, v katerem so primerjali možganske odzive na primeru osebkovih in predmetnih odvisnih stavkov. Pri predmetnih odvisnikih je bila izmerjena večja stopnja koherence, in sicer tako na začetku odvisnika kakor po njegovem koncu. (Weiss/Müller 2003: 339 sl.) To je mogoče razložiti z njegovo večjo zahtevnostjo na ravni slovnične strukture, saj je odvisnik izpeljan iz predmeta v neimenovalniškem sklonu (medtem ko je pri osebkovem odvisniku vršilec dejanja vsebovan v glavnem stavku).

Maguire in Abel (2013: 131 sl.) opozarjata, da meritve možganskih odzivov pri branju stavku slonijo na različnih vrstah slovničnih oz. skladišjskih napak. Na eni strani so odkloni na ravni strukture stavka, kakor je npr. napaka v besednem redu, na drugi strani so morfosintaktične napake, kakor sta npr. neujemalnost med stavčnima členoma (osebkom in povedkom), neustrezna oblika glagola v vlogi povedka ipd. Za napake besednega reda so izmerili upad moči v pasu *beta* (prim. tudi Bastiaansen/Magyari/Hagoort 2010; Davidson/Indefrey 2007), in sicer najprej z latenco 200 ms levo frontalno, še enkrat pa po pribl. 600 ms centralno in desno frontalno ter temporalno. Nasprotno so pri napakah morfosintaktičnega tipa sicer zaznali nihanja v območju *beta*, vendar brez večjih sprememb; te so se pojavile v območju pasu *theta* (prim. tudi Davidson/Indefrey 2007). To kaže na manjšo občutljivost oz. neobčutljivost *bete* na to vrsto odklonov. Velja torej, da je frekvenčni pas *beta* občutljiv na skladišjsko obdelavo v pravilnih pogojih. Moč v območju pasu *beta* narašča pri pravilno tvorjenih stavkih in upada ali se izniči pri nepravilnih.

3.1.4 Z računalniškimi simulacijami so ugotovili, da so možganski ritmi *beta* pomembni pri funkcionalnem povezovanju anatomsko oddaljenih in multimodalnih

¹⁶ Do podobnih ugotovitev so prišli v tipu raziskav, kjer so uporabili tip jezikovne naloge, v kateri je eden od stavkov v paru vseboval semantične odklone.

področij, ki vključujejo več oddaljenih struktur in so pristojna za obdelavo časovno ločenih dogodkov. To je pomembno tudi v procesih jezikovne obdelave, kjer gre za zapletene, kontrolne (odzgoraj-navzdol) in avtomatične (odspodaj-navzgor) procese, ki pripeljejo do multimodalne integracije kortikalno porazdeljenih zaznav. (Hipp idr. 2011: 389–90, 392)

V eksperiment, v katerem so dražljaj posredovali na tri načine, in sicer vizualno, na način govora in v obliki zapisa, so ugotovili povečanje koherence znotraj območja *beta* 1, pri čemer je prišlo do sklopitve frontalnega, parietalnega (temenskega) in vizualnega asociacijskega področja v možganih. To pomeni, da je prišlo do aktivacije več oddaljenih senzoričnih področij in do integracije avditornih in vizualnih informacij. Stein idr. (1999) poudarjajo, da so omenjene frekvence zaslužne za to, da pride v možganih do multimodalne semantične obdelave. Spoznanja se skladajo z ugotovitvami Lurie in več drugih raziskovalcev s konca 60. let prejšnjega stoletja. Na primeru možganskih lezij so namreč pokazali, da je parietalna možganska skorja odgovorna za semantično obdelavo in povezovanje različnih in kortikalno porazdeljenih zaznav v enoten koncept, temporalna skorja pa je pomembna pri obdelavi kompleksnih vizualnih oblik, prepoznavi objektov in vizualnih reprezentacijah. Pokazali so tudi, da je parietalno področje anatomsko povezano z drugimi (senzoričnimi, asociacijskimi) področji, kar v bistvu kaže na njegovo vlogo pri multimodalni semantični integraciji. (Mesulam 1990 v Stein idr. 1999: 147) Vse to je bolj vezano na levo hemisfero, ki je tudi sicer pristojnejša za jezik.

Ker je malo verjetno, da bo vsaka zaznava dražljaja v skorji obdelana sočasno, je logično, da so pri multimodalni semantični integraciji (vsaj) enako pomembni spominski procesi, ki so povezani s temi frekvencami. *Beto* 1 povezujejo s procesi, v katerih je treba primerjati stare in nove informacije, kar se pogosto dogaja v procesih jezikovne obdelave in razumevanja. Odtod sklepajo na pomen tega frekvenčnega območja pri vzdrževanju reprezentacije objektov v (vizualnem) kratkoročnem spominu. (Kopell idr. 2011)

3.2 Gama

Ritmi *beta* so zaslužni za povezovanje več oddaljenih struktur v možganih (tj. frontalnih, parietalnih, vizualnih asociacijskih področij), kar verjetno pomeni, da je ta frekvenčna aktivnost povezana z uravnavanjem delovanja široko razporejenih omrežij (Hipp idr. 2011). To pa ne velja za ritme *gamma*. Ti so značilni za sklopitve manjšega dosega oz. lokalnejše sklopitve, ki bolj verjetno odražajo samo vsebino procesiranja, specifične vzdrževane informacije, denimo tiste v primarni somato-senzorični skorji v parietalnih področjih. (Kopell idr. 2000; Hipp idr. 2011: 390–92.) Z vidika zahtevnosti kognitivnih nalog, ki izzovejo visokofrekvenčna valovanja, je med hitrimi ritmi pomembnejša vloga zato pripisana ritmom *beta* oz. nizkemu frekvenčnem območju *gamma* (do pribl. 35 Hz). To razlagajo z dejstvom, da se zelo oddaljeni nevroni oz. njihove skupine – kar pa je značilno prav za zahtevnejše kognitivne funkcije – ne morejo povezovati v zelo visokih frekvencah, ampak so ravno zaradi oddaljenosti med njimi primernejši nekoliko počasnejši hitri ritmi.

Možganski ritmi *beta* se v procesih jezikovne obdelave pogosto pojavljajo skupaj z *gama*. Gre za obdelavo in povezovanje informacij na različnih jezikovnih ravneh (npr. Bastiaansen/Hagoort 2006; Sauseng/Klimesch 2008),¹⁷ in sicer tako na nivoju semantike (posameznih) besed kakor na nivoju obdelave stavka. V povezavi z *gama* in za razliko od valovanj *beta*, ki se na ravni stavka povezujejo predvsem s procesi skladišne obdelave, je poudarek na stavčnosemantičnem vidiku. Z vidika prostorskih vzorcev možganskih aktivnosti je v omenjenih procesih unifikacije oz. povezovanja jezikovnih podatkov na nivoju stavka najbolj aktivna leva inferiorna frontalna možganska vijuga (girus). (npr. Bastiaansen/ Hagoort)

V skladu z ugotovitvijo, da so semantične lastnosti besede nedvomno povezane z različnimi nevronskimi vzorci, so tudi študije, ki uporabljajo različne metode beleženja možganske aktivnosti (EEG, MEG idr.) in jih zanima jezikovna obdelava besednih kategorij. Med najpogostejšimi eksperimentalnimi preverbami občutljivosti ritmov *gama* na pomenske lastnosti besed so primerjalno zasnovane meritve možganskih aktivnosti pri obdelavi samostalnikov in glagolov, saj so pri njihovi obdelavi in v višjih frekvencah največje spremembe v oscilatorni dinamiki (upad oz. naraščanje spektralne moči v različnih pogojih). Med bolj zanimivimi eksperimenti omenimo primerjalno merjenje možganskih ritmov pri obdelavi pravih besed nasproti t. i. nepravim oz. psevdobesedam¹⁸ ter ugotavljanje možganskih odzivov in prostorskih vzorcev v možganih pri obdelavi različnih vrst besed, ki se razlikujejo glede na pomenske lastnosti.¹⁹ Na eni strani je šlo za t. i. vizualne besede iz skupine konkretnih samostalnikov, za katere velja, da izraziteje spodbudijo vizualne asociacije, na drugi strani za akcijske glagole, ki naj bi praviloma stimulirali motorični del možganov oz. ga pripravili na izvajanje motoričnih gibov. V obeh primerih je bila spektralna moč v območju med 30 in 40 Hz povečana nad vidnimi področji skorje ali v drugem primeru nad motoričnimi področji (razen nad področjem možganov, ki je pristojno za govor). (Pulvermüller idr. 1996a) Podobne spremembe, ki potrjujejo občutljivost *game* na pomenske značilnosti besed, so eksperimentalno ugotovili pri obdelavi psevdobesed. Spektralna moč je bila na ustreznih področjih v možganih večja pri t. i. pravih besedah oz. je upadla pri obdelavi psevdobesed; natančneje, prišlo je do upada v nizkem območju *gama* med 25 in 35 Hz in nad levo hemisfero, ko so možgani psevdobesedo identificirali kot nepomenonosno enoto.²⁰ (Pulvermüller idr. 1996a)

Aktivnost v območju *gama* povezujejo s semantično obdelavo tudi na ravni stavka oz. stavčnih pomenov. To ugotavljajo prek lingvističnih manipulacij v stavku, kakor je uporaba besed, ki so glede na stavčni pomen neustrezne oz. nepričakovane. Ugotovili so, da semantično neustrezna beseda v stavku izzove upad v območju *gama* (in v nasprotju s tem povečanje moči v območju *theta*). Odtod sklepajo, da je povečanje v frekvenčnem pasu *gama* pravzaprav običajna nevronska aktivnost, po-

¹⁷ Giraudovo in Poeppla (2012) so sicer zanimala možganska nihanja glede na različne vidike govora (in ne [tihega] branja), vendar si morda ni odveč zapomniti, da so aktivnostim možganov v višjih frekvenčnih območjih, kakor sta *gama* in *beta*, prav tako pripisane zasluge za unifikacijo, tj. obdelavo in povezovanje dohodnih jezikovnih podatkov v ustreznem časovnem zaporedju.

¹⁸ Praviloma so izgovorljive, vendar nimajo nikakršnega pomena.

¹⁹ Te so pomemben kriterij pri uvrščanju k besednim vrstam.

²⁰ Podobno pravijo tudi ERP raziskave.

vezana z jezikovno obdelavo, oz. da je aktivnost *gama* pričakovan in normalen odziv v pravih stavčnih pogojih, ko se v stavku pojavi semantično predvidljiva beseda. (Hagoort idr. 2004, Hald idr. 2006, Penolazzi idr. 2009 v Bastiaansen idr. 2010)

Bastiaansen in Hagoort sta hipotezo, da semantična obdelava na ravni stavka izzove večjo aktivnost v območju *gama*, skladišna obdelava pa v spodnjem območju *beta* in znotraj omrežij v levi frontotemporalni skorji, skušala dodatno preveriti v novjšem eksperimentu (2015). Preiskovanci so morali prebrati pravilno tvorjene stavke in stavke, ki so vsebovali skladišnsko ali pomensko napako. Potrdila sta, da pride do naraščanja moči v območju *gama* pri stavkih, ki ne vsebujejo semantične napake. Moč v območju pasu *beta* pa je bila po pričakovanjih večja v pravih stavčnih pogojih, ko ni bilo skladišnske napake. Rezultati na ravni obdelave stavka potrjujejo obstoj razlik v možganskih nihanjih pri semantični in skladišnski obdelavi.

4 Jezikovna obdelava in počasni možganski ritmi

4.1 Theta

Če na ravni obdelave stavka velja, da semantično neustrezna beseda povzroči upad moči v območju *gama*, pride v enakih pogojih po pravilu do povečanja moči v frekvenčnemu pasu *theta*. Odtod sklepajo, da je povečanje v območju *theta* povezano s »popravljanjem« napak in s tem povezanim priklicem (pravih) informacij iz spomina, na kratko, z verbalnimi spominskimi procesi. Če je povečanje v območju *gama* normalen odziv na pravilne stavčne pogoje, potem je povečanje v območju *theta* prav tako običajen odziv na stavčnosemantične kršitve. Aktivnost *theta* poleg tega povezujejo s procesi skladišnske obdelave, pri čemer gre po eni strani za obdelavo kršitev na ravni skladnje in po drugi strani za obdelavo v povsem pravih pogojih. *Theta* ni neobčutljiva niti na semantične lastnosti na ravni (posameznih) besed.

Ko gre za obdelavo stavkov,²¹ bi rezultate raziskav z vidika prostorskega povezovanja nevronske skupke v možganih lahko strnili v naslednje splošne vzorce: moč *theta* se poveča nad levim zatilnim (okcipitalnim) področjem, temporalno na obeh straneh in nad frontocentralnimi področji. Oscilatorna moč usklajeno narašča v bolj ali manj oddaljenih predelih možganske skorje oz. je povečanje oscilatorne aktivnosti v območju *theta* lahko posledica sklopitve nevronov, ki so povezani bodisi bolj lokalno bodisi gre za prostorsko oddaljena nevronska omrežja. Povečanje moči v okcipitalnih predelih povezujejo z identifikacijo oz. dekodiranjem vizualne podobe besed oz. vizualnim zaznavanjem, nad temporalnimi predeli pa s procesi priklica konkretnih (leksikalnih) pomenov oz. z verbalnimi spominskimi procesi.²² Nekoliko težje je razložiti povečanje moči frontocentralno. Po eni strani ga povezujejo z delovnospominskimi procesi, po drugi strani pa ga omenjajo v povezavi s skladišnskimi napakami. (npr. Hald idr. 2006: 92; 98 sl.)

Če upoštevamo razdelitev na dve večji skupini skladišnskih napak, kakor sta jih predlagala Maguire in Abel (2013: 132 sl.), ki se nanašajo na besedni red in na raven

²¹ Na podoben način kakor pri ERP raziskavah se predvajajo prek računalniškega zaslona.

²² V temporalnem režnju je tudi področje za razumevanje govora.

morfosintakse, je treba v zvezi z nihanji moči v območju *theta* dodati, da ta ni enako občutljiva na vse napake. Občutljivejša je na drugo vrsto omenjenih napak, kjer opazimo naraščanje v časovnem obdobju pribl. 300–500 ms po prikazu dražljaja. Vendar so hkrati ugotovili, da spremembe v območju *theta* niso občutljive na vse morfosintaktične odklone, kakor je npr. neujemanje med osebkom in glagolom v napačnem številu, kjer pride do upada moči v območju *beta*. Aktivnost v območju *theta* zaradi njene stalne prisotnosti in naraščanja v poteku stavka, s poudarkom na prednjih predelih možganov, povezujejo z obdelavo stavka in verbalnimi spominskimi procesi. Še enkrat velja spomniti na eksperiment z odvisnimi in glavnimi stavki, kjer je naraščanje v območju *theta* seveda izrazitejše pri obdelavi prvih.

Povečanje moči v območju *theta* razen s skladenjskimi kršitvami in obdelavo na ravni skladnje povezujejo s semantičnimi kršitvami v stavku. Spodbujeno je namreč z obdelavo vsebinsko neustreznih besed v stavku (kjer bi torej pričakovali drugo besedo). Razvidno je, da se valovanje v tem območju izraziteje poveča v primeru, ko se v stavku pojavi pomensko neustrezna beseda, in sicer je *theta* najizrazitejša nad prednjimi predeli in centralno. To kaže na njeno občutljivost na napake na ravni stavčne semantike – in s tem povezane spominske procese. (Hald idr. 2006: 99)

S časovno-frekvenčno analizo so ugotovili tudi občutljivost *theta* na semantične lastnosti besed, kar je bil vzporedni rezultat enega od eksperimentov, v katerem so kot vhodna podatka uporabili dvojce besed (*grba* in *puščava*), ki sta bili pomensko povezani s ciljno besedo (*kamela*), pri čemer se je uspešnost semantičnega priklica odrazila v povečanju moči v območju *theta* (Hart idr. 2012). Tak rezultat napeljuje na sklep, da so bili vpleteni spominski procesi. Rečeno drugače, gre za vpletenost procesov priklica in identifikacije semantičnih tipov podatkov.

Občutljivost *theta* na semantične lastnosti besed ponazarjajo študije, ki uporabljajo besedne pare, v katerih sta besedi bodisi tematsko in taksonomsko povezani bodisi ni med njima nobene zveze. Ugotovili so povečanje v območju *theta* in nad desno hemisfero spredaj v primeru, ko ena od besed v paru ni tematsko povezana z drugo, kar pojasnjujejo z večjim kognitivnim naporom pri procesiranju jezikovnih podatkov, spominskim priklicem in nasploh z verbalno spominskimi procesi, ki so pri tem na delu. (Maguire/Abel 2013: 129 sl.)

5 Kako pa je z dinamiko možganskih ritmov pri jezikovni obdelavi, ki je podlaga branju odlomkov literarnih besedil? Postavlja se več vprašanj, ki jih skušamo razrešiti. Ker predpostavljamo, da na dinamiko ritmov nihanja in s tem povezane nevronske vzorce do neke mere vpliva tudi literarnodiskurzivni kontekst, sumimo, da bo prišlo pri »kršitvah« v strukturi stavka (npr. predrugачen besedni red) ali na ravni besedne in stavčne semantike do zmanjšanja ali izničenja moči v območjih pasov *beta* in *gamma*. To bi bilo mdr. mogoče razložiti z dejstvom, da našete vrste kršitev oz. odklonov v literarnih (npr. pesemskih) besedilih niso pripoznane kot napake (besedni red je lahko narekovan s strani metrične sheme oz. ritma).²³ Zanima

²³ Prav tako pa bi na takšno odzivanje možganov lahko učinkovala večja frekventnost tovrstnih pojavov v literarni vrsti besedil. Zato bi utegnili posebej pomembno vlogo pri branju besedil, ki veljajo za literarna, igrati prav počasni ritmi *theta*, ki so razen z obdelavo odklonov na različnih jezikovnih ravneh povezani z verbalnimi spominskimi procesi.

nas tudi, kaj se dogaja z dinamiko možganskih ritmov pri branju besedil, ki jih umeščamo k različnim literarnim zvrstem (lirika vs. pripovedništvo). V povezavi s tem pa se postavlja vprašanje, ali in kako se v možganski aktivnosti odražajo različni literarno-slogovni postopki in njihovo menjavanje. Eno izmed mnogih vprašanj je tudi, kako na dinamiko možganske aktivnosti vplivajo medialne značilnosti literature, ki določajo načine njenih branj (npr. klasično branje in branje z zaslona). Ponuja se nekaj zanimivih odgovorov.

VIRI IN LITERATURA

- C. BABILONI, F. BABILONI, F. CARDUCCI, F. CONCOTTI, G. COCOZZA, C. DEL PERCIO, D. V. MORETTI, P. M. ROSSINI, 2002: Human cortical electroencephalography (EEG) rhythms during the observation of simple aimless movements. *Neuroimage* 17. 559–72.
- D. M. BARCH, 2006: What can research on schizophrenia tell us about the cognitive neuroscience of working memory? *Neuroscience* 139/1. 73–84.
- L. W. BARSALOU, 2008: Grounded cognition. *Annual review of psychology* 59. 617–45.
- M. C. M. BASTIAANSEN, P. HAGOORT, 2006: Oscillatory neuronal dynamics during language comprehension. *Progress in brain research* 159. 179–96.
- M. C. M. BASTIAANSEN, L. MAGYARI, P. HAGOORT, 2010: Syntactic unification operations are reflected in oscillatory dynamics during online sentence comprehension. *Journal of cognitive neuroscience* 22/7. 1333–47.
- M. C. M. BASTIAANSEN, P. HAGOORT, 2015: Frequency-based segregation of syntactic and semantic unification during online sentence level language comprehension. *Journal of cognitive neuroscience* 27/11. 2095–107.
- S. BREŽAN, V. RUTAR, V. LOGAR, B. KORITNIK, G. KURILLO, A. BELIČ, T. BAJD, J. ZIDAR, 2004: Elektroencefalografska koherenca. *Psihološka obzorja* 13/2. 61–69.
- D. J. DAVIDSON, P. INDEFREY, 2007: An inverse relation between event-related and time-frequency response in sentence processing. *Brain research* 1158. 81–92.
- M. D'ESPOSITO, 2007: From cognitive to neural models of working memory. *Philosophical transactions of the Royal Society B* 362. 761–72.
- M. D'ESPOSITO, B. R. POSTLE, 2015: The cognitive neuroscience of working memory. *Annual review of psychology* 66/1. 115–42.
- A. E. FISHER, P. L. FURLONG, S. SERI, P. ADJAMIAN, C. WITTON, T. BALDWEG, S. PHILLIPS, R. WALSH, J. M. HOUGHTON, N. J. THAI, 2008: Interhemispheric differences of spectral power in expressive language. *International journal of psychophysiology* 68. 111–22.
- A. L. GIRAUD, D. POEPEL, 2012: Cortical oscillations and speech processing. *Nature neuroscience* 15. 511–17.
- A. M. GLENBERG, 1997: What memory is for. *Behavioral and brain sciences* 20. 1–55.

- P. HAGOORT, 2003: How the brain solves the binding problem of language. *Neuroimage* 20. 19–29.
- L. A. HALD, M. BASTIAANSEN, P. HAGOORT, 2006: EEG theta and gamma responses to semantic violations in online sentence processing. *Brain & language* 96/1. 90–105.
- J. HARI idr., N. FORSS, S. AVIKAINEN, E. KIRVESKARI, S. SALENIUS, G. RIZZOLATTI, 1998: Activation of human primary motor cortex during action observation. *The proceedings of the National academy of sciences of the U. S. A.* 95. 15061–65.
- J. HART, M. J. MAGUIRE, M. MOTES, R. A. MUDAR, H.-S. CHIANG, K. B. WOMACK, M. A. KRAUT, 2013: Semantic memory retrieval circuit. *Brain & language*. 12689–98. Na spletu.
- J. F. HIPPI, A. K. ENGEL, M. SIEGEL, 2011: Oscillatory synchronization in large-scale cortical networks predicts perception. *Neuron* 69. 387–96.
- N. KOPELL, G. B. ERMENTROUT, M. WHITTINGTON, R. D. TRAUB, 2000: Gamma rhythms and beta rhythms have different synchronization properties. *The proceedings of the National academy of sciences of the U. S. A.* 97. 1867–72. Na spletu.
- N. KOPELL, M. A. WHITTINGTON, M. A. KRAMER, 2011: Neural assembly dynamics in the beta 1 frequency range permits short-term memory. *The proceedings of the National academy of sciences of the U. S. A.* 108. 3779–84.
- S. J. LUCK, E. K. VOGEL, 2013: Visual working memory capacity. *Trends in cognitive sciences* 17/8. 391–400.
- W. J. MA, M. HUSAIN, P. M. BAYS, 2014: Changing concepts of working memory. *Nature neuroscience* 17/3. 347–56.
- M. J. MAGUIRE, A. D. ABEL, 2013: What changes in neural oscillations can reveal about developmental cognitive neuroscience. *Developmental cognitive neuroscience* 6. 125–36.
- S. MAKEIG, M. WESTERFIELD, T.-P. JUNG, S. ENGHOFF, J. TOWNSEND, E. COURCHESNE, T. J. SEJNOWSKI, 2002: Dynamic brain sources of visual evoked responses. *Science* 295. 690–694.
- V. OERTEL-KNÖCHEL, R. A. BITTNER, C. KNÖCHEL, D. PRVULOVIC, H. HAMPEL, 2011: Discovery and development of integrative biological markers for schizophrenia. *Progress in neurobiology* 95/4. 686–702.
- F. PEREIRA, T. MITCHELL, M. BORVINICK, 2009: Machine learning classifiers and fMRI. *NeuroImage* 45/1. Na spletu.
- U. PERENIČ, J. BON, 2015: Eksperimentalna uporaba kvantitativne elektroencefalografije pri analizi (literarnega) branja: Z dogodkom povezani ERP valovi (Event-Related-Potentials). *Slavistična revija* 63/2. 135–53.
- B. R. POSTLE, 2015: The cognitive neuroscience of visual short-term memory. *Current opinion in behavioral sciences* 1. 40–46.
- F. PULVERMÜLLER, 1996: Hebb's concept of cell assemblies and the psychophysiology of word processing. *Psychophysiology* 33. 317–33.

- F. PULVERMÜLLER, H. PREIBL, W. LUTZENBERGER, N. BIRNBAUMER, 1996a: Brain rhythms of language. *European journal of neuroscience* 8. 937–41.
- F. PULVERMÜLLER, 2001: Walking or talking? *Brain & language* 78. 143–68.
- G. REPOVŠ, A. BADDELEY, 2006: The multi-component model of working memory. *Neuroscience* 139/1. 5–21.
- B. J. ROACH, D. H. MATHALON, 2008: Event-related EEG time-frequency analysis. *Schizophrenia bulletin* 34/5. 907–26.
- F. ROUX, M. WIBRAL, H. M. MOHR, W. SINGER, P. J. UHLHAAS, 2012: Gamma-band activity in human prefrontal cortex codes for the number of relevant items maintained in working memory. *Journal of neuroscience* 32/36. 12411–20.
- F. ROUX, P. J. UHLHAAS, 2014: Working memory and neural oscillations. *Trends in cognitive sciences* 18/1. 16–25.
- V. SAKKALIS, 2011: Review of advanced techniques for the estimation of brain connectivity measured with EEG/MEG. *Computers in biology and medicine* 41/12. 1110–17.
- P. SAUSENG, W. KLIMESCH, W.R. GRUBER, S. HANSLMAYR, R. FREUNBERGER, M. DOPPELMAYR, 2007: Are event-related potential components generated by phase resetting of brain oscillations? *Neuroscience* 146/4. 1435–44.
- P. SAUSENG, W. KLIMESCH, 2008: What does phase information of oscillatory brain activity tell us about cognitive processes? *Neuroscience & biobehavioral reviews* 32/5. 1001–13.
- B. SCHACK, A. C. N. CHEN, S. MESCHA, H. WITTE, 1999: Instantaneous EEG coherence analysis during the Stroop task. *Clinical neurophysiology* 110. 1410–26.
- T. J. SEJNOWSKI, G. TESAURO, 1989: The Hebb rule for synaptic plasticity. *Neural models of plasticity*. Ur. J. O. Byrne, W. O. Berry. New York: Academic Press.
- K. D. SINGH, G. R. BARNES, A. HILLEBRAND, E. M. FORDE, A. L. WILLIAMS, 2002: Task-related changes in cortical synchronization are spatially coincident with the hemodynamic response. *Neuroimage* 16. 103–14.
- J. X. VAN SNELLENBERG, I. J. TORRES, A. E. THORNTON, 2006: Functional neuroimaging of working memory in schizophrenia. *Neuropsychology* 20/5. 497–510.
- A. von STEIN, P. RAPPELSBERGER, J. SARNTHEIN, H. PETSCHKE, 1999: Synchronization between temporal and parietal cortex during multimodal object processing in man. *Cerebral cortex* 9. 137–50.
- M. TEPLAN, 2002: Fundamentals of EEG measurement. *Measurement science review*. Zv. 2. Na spletu.
- P. J. UHLHAAS, W. SINGER, 2010: Abnormal neural oscillations and synchrony in schizophrenia. *Nature reviews neuroscience* 11/2. 100–13.
- P. J. UHLHAAS, 2013: Dysconnectivity, large-scale networks and neuronal dynamics in schizophrenia. *Current opinion in neurobiology* 23/2. 283–90.

S. WEISS, H. M. MÜLLER, 2003: The contribution of EEG coherence to the investigation of language. *Brain & language* 85. 325–43.

--, 2012: Too many betas do not spoil the broth. *Frontiers in psychology* 3. Na spletu.

SUMMARY

The article is the second part of the survey on the use of the electroencephalographic (EEG) methods in the analysis of (literary) reading. Contrary to prevalent cognitive theories, which propose that the brain works according to the principle of specialized modular processes (the so-called modular model), alternative theories supported by emerging brain imaging data presuppose the existence and simultaneous interactions of a number of different representations, supported and maintained by distributed neuronal mechanisms (the so-called activated states model). This question can also be approached by using the time-frequency analysis of EEG data, which, compared to the classic ERP analysis, allows an insight into parallel processing by dividing time course of oscillatory electrical activity of the brain into frequency bands. Individual frequency bands are considered to be important for various aspects of cognitive mechanisms, which are also the basis of language processing in reading. In the context of language processing, the most interesting brain rhythm is *beta*, as it is related to the performance of higher-order cognitive functions. (1) In this frequency band, during the course of language processing and understanding (words, sentences), simultaneous changes in oscillatory activity of neurons in locomotor areas of the cortex can be observed, which supports the idea of materialized cognition and functional connections between locomotor and cognitive functions. (2) The *beta* brain rhythms are related with the processing of lexical and syntactic meanings, i.e., the processing at the syntactic level. (3) Computer simulations have also shown the importance of *beta* rhythms in functionally connecting anatomically distant and multimodal areas of the cortex, which is particularly important in the course of language processing. On the other hand, the *gamma* rhythms are more typical of the shorter-range connections. In language processing, they often appear together with the *beta* rhythms. Researchers have noticed the sensitivity of the *gamma* rhythms to the semantic features of words belonging to various parts of speech. The activity in the *gamma* band is also related to the processing of syntactic semantics. The slow *theta* rhythms are thought to reflect “corrections” of errors in the sentence, which is explained as a process of recalling the correct information from the memory, i.e., through memory processes. The *theta* rhythm is also sensitive to the semantic features of words and to syntactic processing. This corresponds to the finding that a parametric increase in oscillatory amplitudes in all frequency bands corresponds to the increase in difficulty of cognitive processes.

