

Funktsionaalne magnetresonantstomograafia

Tiiu Tomberg¹, Kalle Kepler² –

¹TÜ närvikliinik, TÜ Kliinikumi radioloogiateenistus, ²TÜ füüsika instituut

Võtmesõnad: funktsionaalne magnetresonantstomograafia, põhimõte, kliinilised näidustused

1990. aastate alguses täienesid magnetresonantstomograafia (MRT) rakendusvõimalused uue uurimismeetodi – funktsionaalse MRT (fMRT) – näol. Sellest ajast alates on fMRT-d kasutatud nii kliinilistes kui ka teaduslikes uuringutes peaaegu aktivatsioonialade lokaliseerimiseks. Kliinilistes uuringutes võimaldab fMRT lokaliseerida tähtsaid keskusi ajus enne neurokirurgilist operatsiooni, et vältida nende vigastust operatsiooni käigus, samuti saab fMRT abil jälgida aju funktsionaalset plastilisust seoses rehabilitatsiooniga mitmesuguste ajukahjustuste korral. Teadusuuringutes on fMRT-d eelkõige kasutatud spetsiifiliste kortikaalsete funktsioonide uurimiseks keerukate neuropsühholoogiliste katsemudelite abil. Alates 2007. a on tehtud fMRT-uuringuid Tartus TÜK radioloogiateenistuse baasil. Artiklis on antud ülevaade fMRT põhimõttest ja kliinilistest kasutusvaldkondadest.

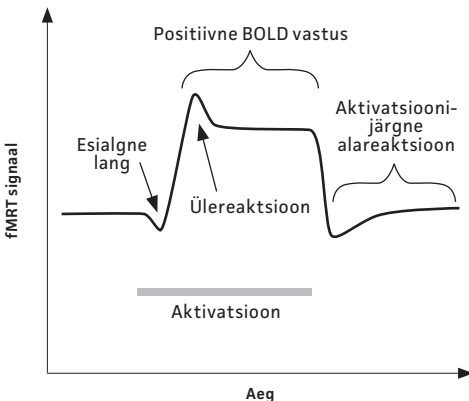
Funktsionaalse MRT meetod põhineb Ogawa (1) ning Turneri jt (2) 1990. aasta-

te algul tehtud uuringutel, mis näitasid, et MRT lokaalse signaali intensiivsus on seotav vere oksügenatsiooni tasemega. Mõõdetav kontrastsus kannab nimetust BOLD (*blood oxygenation level-dependent*) kontrastsus ja meetodit nimetatakse ka BOLD-metodiks. Kuna lokaalne neuronaalne aktiivsus põhjustab lokaalset verevoolu ja vere oksügenatsiooni suurenemist, siis võimaldab see kaudselt hinnata aktiveerunud alasid ajus. Kuigi selle meetodi puhul ei mõõdetata otseselt ajuperfusiooni, saab vere oksügenatsiooni taseme muutuste kaudu esile tuua rohkem või vähem perfundeeritavaid alasid. Enamasti kasutatakse fMRT signaali tuvastamiseks nn endogeenset kontrastmehhanismi. Vähem kasutatakse fMRT kliinilistes rakendustes eksogeenseid kontrastaineid (nt gadoliiniumipõhised kelaadid), kuna nende kasutamine seab ajalised piirangud ja on seotud muude tehniliste nõuetega; käesolevas ülevaates neid ei käsitleta.

Endogeense kontrastsuse korral sõltub fMRT signaali intensiivsus oksühemoglobiini ja deoksühemoglobiini osakaalude suhtest ajukoos. On teada, et oksühemoglobiin on diamagnetiline (sarnaselt ajukoega), samal ajal kui deoksühemoglobiin on paramagnetiliste omadustega ja selle lokaalne väli kiirendab vee prootonite relaksatsiooni, põhjustades veresoones sisalduva deoksühemoglobiini vahetus ümbruses vee prootonite MRT-signaali nõrgenemist (1). Oksügenatsiooni taseme tõusust tingitud lokaalse magnetilise vastuvõtlikkuse muutusi on aktiveeritud ajupiirkondades võimalik visualiseerida, kasutades T2*-kaalutud sekventse.

BOLD-efekti inimaju uuringutes kasutavad ühena esimestest Kwong jt (3). Lühidalt võib seda kirjeldada järgmiselt. Neuraalse aktiivsuse suurenemine aju mingis piirkonnas kutsub esile ainevahetuse intensiivistumise, lokaalse vasodilatatsiooni, veremahu ja verevoolu suurenemise samas. Mingil hetkel ületab hapniku juurdevool metaboolsed vajadused ning deoksühemoglobiini ja oksühemoglobiini suhe väheneb. Deoksühemoglobiini osakaalu vähenemine põhjustab T2-relaksatsiooniaja pikenedamist ja MR-signaali intensiivistumist. Ajuaktiivsiooniks kasutatakse erinevaid testülesandeid olenevalt sellest, millist keskust soovitakse aktiveerida.

Neuraalse aktiivsuse muutused testi sooritamise ajal põhjustavad suhteliselt vähese BOLD-signaali muutuse, maksimaalselt 5–10% (sõltudes magnetväljast, vastavalt 1,5 T kuni 3 T). Tüüpiline BOLD-vastus aktiivsioonile on trifaasiline (vt jn 1). Ca 2 sekundit pärast aktiivsiooni algust koe hapnikuküllastus suureneb, kuid veremahu muutusi ei esine. Sel ajal deoksühemoglobiini hulk suureneb ja MR-signaali



Joonis 1. Hemodünaamilise (BOLD) reaktsiooni ideaalne lainekuju kestva aktiivsiooni (umbes 20 s) korral. Teoreetiliselt oodatav esialgne lang ei ole fMRT-uuringus usaldusväärset moodetav. Kestva aktiivsiooni korral ületab signaali algne tase (ülereaktsioon) järgneva platoo taseme. Aktiivsiooni lõpetamisel langeb signaal enamasti alla baastaset (alareaktsioon), taastudes seejärel aeglaselt (4).

intensiivsus väheneb. Sellele perioodile järgneb regionaalse verevoolu ja veremahu suurenemine – nn luksusperfusioon 2–5 s jooksul pärast aktiivsiooni algust, põhjustades hüperoksügenatsiooni ja oksühemoglobiini kontsentratsiooni suurenemist koes. Aktiivsiooni lõppedes aju verevool väheneb uuritavas piirkonnas kuni algtasemeni ca 5 s jooksul. Enne stabiliseerumist endisele tasemele signaaliintensiivsus väheneb alla baasväärtust hapnikuvarude ammendumise või veremahu aeglase taastumise tõttu.

BOLD-signaali muutusi saab modelleerida ka kui venoosse veremahu muutusi. Venoosse vere maht suureneb vastavalt sellele, kuidas verevool kapillaaridesse suureneb, ja jätkub, kuni saavutatakse tasakaal regionaalse venoosse veremahu ja venoosse äravoolu vahel. Tuleb silmas pidada, et kapillaaride ja dreenerivate veenulite anatoomiline vahetorkord võib mõjutada BOLD-reaktsiooni lokaliseerimist (4):

- aktiveeritud neuron ja dreeneriv veenul pole alati samas vokslis;
- venoosse vere maht ja deoksühemoglobiini sisaldus muutuvad aktiveeritud neuronitest kaugemal;
- inaktiivne naabervoksel, kus on sama venoosne дренаaz, võib samuti näida aktiveerituna.

Need mõjustused on olulisemad visuaalses kortexis, kus verevool on topograafiliselt heterogeensem (nn dominantsed sambad) ja artefaktide oht suurem. Lisaks sellele on BOLD-signaal mõjustatud verevoolust kihti läbivates suurtes ajuarterites ja muudest lokaalsetest vereringe muutustest (5).

METOODIKA

Füüsikalised alusprintsiihid nii anatoomiliste kui ka funktsionaalsete MRT-uuringute puhul on samad, seetõttu on fMRT-uuringute jaoks sobiv ka tavauuringutes kasutatav magnetresonantstomograaf väljatugevusega 1,5 T. Viimastel aastatel on paljudes haiglates võetud kasutusele 3 T magnetid, mis annavad parema fMRT kontrastsuse ja lahutusvõime. Enamasti fMRT-uuringu teos-

tamiseks kasutatavad EPI-sekvensid (*echo planar imaging*) seavad aga MRT-skannerile (sh gradientmähistele) kõrgendatud nõuded, kuna iga üksiku kihi skaneerimiseks vajalik aeg peab jääma alla 100 ms pea liikumise mõjude minimeerimiseks.

Enamasti on fMRT-uuringutes esimeseks ülesandeks lokaliseerida aju aktiivsuskeskused. Selleks tuleb registreerida kogu aju MRT-kujutised. EPI-sekvensid võimaldavad mitmekihilist andmehõivet paari sekundi jooksul. Nii võib näiteks nelja sekundiga koguda andmed 36 kihist matriksiga 64×64 ; aksiaalse orientatsiooniga 1 mm vahekaugusega 3 mm paksuste kihtide korral kogutakse kujutised 14,4 cm paksusest ruumalast.

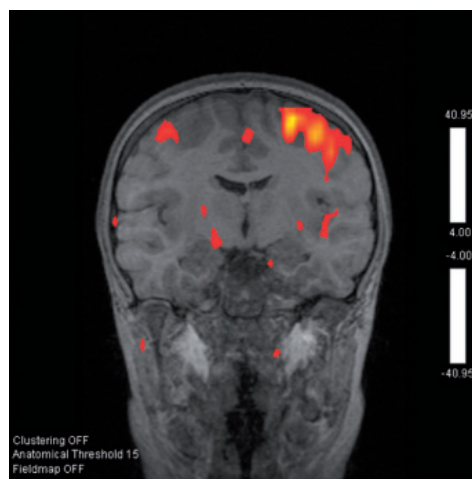
Sõltuvalt uuringu kestusest kogutakse ühes uuringus sadu või tuhandeid $T2^*$ -kaalutud kujutisi. Tihti on võimalik teha fMRT tulemuste eelhindamine magnetresonants-tomograafi juhtpuldi monitoril, kasutades tomograafi süsteemset tarkvara. Täpsemaks kvantitatiivseks analüüsiks saadetakse kogutud andmed siiski eraldi tööjaama. Selliseks analüüsiks on välja töötatud mitmeid programme, millest tuntuimad on *Analysis of Functional Neuroimages (AFNI)*, *Statistical Parametric Mapping (SPM)*, *Brain Voyager* ja *FMRIB Software Library (FSL)*. Nendes programmides kasutatavad andmetötluse ja analüüsi protseduurid on üldiselt sarnased, erinedes vaid mõnede matemaatiliste meetodite ja kasutajaliidese poolest.

Esmalt toimub andmete ruumiline ja ajaline eeltöötlus, mis hõlmab kujutiste joondamist, võttes arvesse pea võimalikke nihkeid ja pöördeid seeria jooksul ning signaali triivi, seejärel normeerimist etteantud templaa-di alusel ning silumist. Pärast seda toimub andmete statistiline analüüs, mis eeldab disainimudeli (aktiivsiooni paradigma) kirjeldamist oodatavate kontrastsustega, kujutiste subtraktsiooni ja mudeli sobitamist, nt SPMi puhul parameetrilise statistilise mudeli rakendamist iga vokslile jaoks, kasutades mitmest regressioonanalüüsi ehk nn GLMi (*General Linear Model*) meetodit (6, 7). Selle tulemusena leitakse etteantud usaldusni-

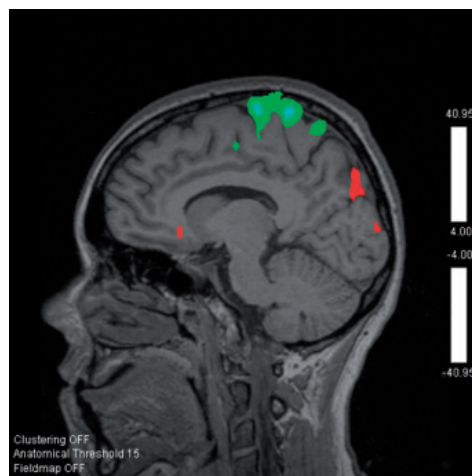
vool statistiline parameetriline kaart, millele järgneb funktsionaalsete ja anatoomiliste (enamasti $T1$ -kaalutud suurema lahutusvõimega kujutistena) andmete integreerimine ja fMRT-kujutiste esitus kahe- või kolme-mõõtmelisel kujul.

KLIINILISTE FMRT-UURINGUTE PARADIGMAD

fMRT-uuringutel kasutatakse erinevaid katsemudeleid ajukoore aktivatsiooni esile-



Joonis 2. fMRT: motoorne test parema käega – aktiveerunud käe motoorne keskus vasemal pretsentraalkäärus, vähenenud aktivatsioon analoogses keskusel paremal ja abistavas keskusel mediaalsel.



Joonis 3. fMRT: motoorne test parema labajalaga – aktiveerunud jala motoorne keskus vasema hemisfääri mediaalses osas.

kutsumiseks. Kasutusel on mitmesugused välised stiimulid: motoorsed, sensoorsed, optilised, akustilised, kognitiivsed (mälu, kõne, tähelepanu jt). Olenevalt testist aktiveeruvad primaarsed ja assotsiatiivsed keskused. Spetsiifiliste kortikaalsete funktsioonide uurimiseks on olulised standardsed ja optimaalsed stiimulid. Sensorsete ja visuaalsete stiimulite edastamiseks on vajalikud ka lisaseadmed.

Kliinilistes uuringutes on enam levinud motoorsed testid käe motoorse keskuse visualiseerimiseks ja kõnetestid kõnekeskuse hemisfäärse dominantsuse kindlakstelemiseks. Motoorsetest testidest on enam kasutatavad sõrmede järjestikune vastandamine põidlale (*finger tapping*) või sirutus- ja painutusliigutused randmest. Võib kasutada ka labajala dorsaal- ja plantaarfleksiooni, huulte, keele liigutusi jm. Need stiimulid põhjustavad selge aktivatsiooniala primaarses motoorses keskuses pretsentraalkäärus, kusjuures assotsiatiivsed keskused ei aktiveeru või aktiveeruvad vähesel määral (vt jn 2 ja 3). Aktivatsiooniala ulatus sõltub testi sooritamise kiirusest ja selle juures rakendatud jõust (8). Kui patsient pole pareesi tõttu võimeline testi sooritama, võib teha ka passiivse testi uurija kaasabil või mõttelise testi, kus patsient rakendab oma kujutlusvõimet motoorse testi imiteerimisel. Teadvuseta patsiendil on võimalik stiimulina kasutada sensorset puudutustesti, et kindlaks teha aju funktsionaalset reaktiivsust.

Kõnekeskuse aktiveerimiseks kasutatakse põhiliselt kahesuguseid teste: Broca keskuse aktiveerimiseks sõnade genereerimist (nt tuletada kindla nimisõnaga seotud tegusõna, sõnu kindla algustähega või kindlast kategooriast) ja Wernicke keskuse aktiveerimiseks semantilise otsustamise ülesandeid (sõnade, lausete tähenduse mõistmine), objekti nimetamist, lugemist (8). Kõnekeskuse hemisfäärse dominantsuse määramiseks on soovitatav uuringul kasutada mitut testi, et olla tulemusel kindel. Siiski annab enam väljendunud aktivatsioonini sõnatuletustest (8).

Auditoorsete testide kasutamisel, nt jutustava teksti kuulamisel, aktiveerub primaarne kuulmiskeskus oimusagaras kahepoolselt, kuid paremakäelistel enam vasemas hemisfääris, lisaks aktiveerub ka *g. supramarginalis* vasemal. Võib kasutada ka tundmatut võõrkeelset teksti ja tähenduseta sõnu. Mitteverbaalse auditoorse testi korral, nt muusika või helindite kuulamisel, on aktivatsioon paremas oimusagaras suurem kui vasemas.

Nägemiskeskuse uurimiseks on vajalik stimulatsiooniseadme olemasolu. Primaarse nägemiskeskuse stimulatsiooniks kasutatakse 8 Hz sagedusega muutuvat malemustrit jt sarnaseid. Olenevalt kasutatavast testist aktiveeruvad ka assotsiatiivsed keskused. Et aktiveerida kindlaid vaatevälja osi, kasutatakse valgust emiteerivaid diode või vedelkristalldiodiga projektorit. Kompleksseid visuaalseid teste kasutatakse kognitiivsetel uuringutel. On võimalik ka nn selektiivne aktivatsioon: värvide analüüs, liikumisega seotud kujundite kasutamine. Lisaseadmete (peegel-optiline süsteem) olemasolu korral on testide valik oluliselt suurem ja saab kasutada komplitseeritumaid katsemudeleid. Viimaseid rakendatakse eelkõige neuropsühholoogiliste uuringute puhul.

fMRT-uuringul tehakse korduvaid mõõtmisi, kusjuures testiperiood vaheldub kas rahuolekuga või teise testiga. Uuritav peab fMRT-uuringu tegemisel olema täielikult kontaktne, tuleb vältida pea ja teiste kehaosade liikumist, et vältida artefakte. Eelnevalt tuleb selgitada uuringu käiku ja harjutada testi sooritamist. Vahetult enne uuringut peab uuritavale kordama tegevuskava ja nõudeid uuringu edukaks teostamiseks.

PREOPERATIIVNE FMRT

Preoperatiivse fMRT-uuringu eesmärgiks on kindlaks teha nn aktivatsioonifookuse täpne lokaliseerimine kujutisel koos vastavate anatoomiliste struktuuride (ajukäärude) identifitseerimisega. Kahtlemata tuleb siin arvestada patoloogiast tingitud piirangutega, kus ajukäärude täpne eristamine võib

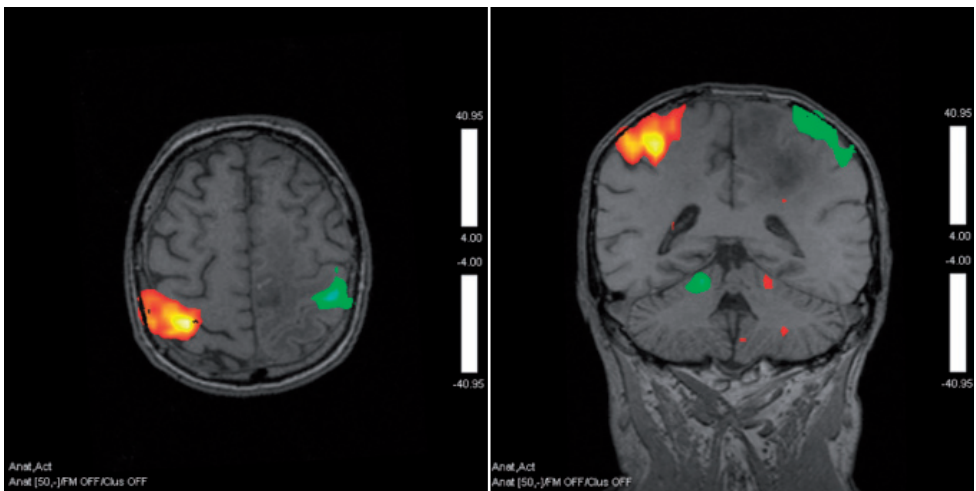
olla raskendatud. Teiseks peab silmas pidama, et aktivatsioonifookuse ulatus sõltub uuringuandmete analüüsil määratletud statistilisest lävest ja klasteri suurusest. BOLD-signaali intensiivsus ja klasteri suurus oleneb ka kasutatud paradigmast. Seega ei saa kirurgilise resektsiooni ulatust määrata ainuüksi aktivatsiooniala piiride alusel. Lahendusena kasutatakse andmete järeltöötusel nn dünaamilist statistilise läve muutmist. Sel puhul alustatakse maksimaalsest lävest, kus aktivatsiooniala üldse esile ei tule, ning seejärel alandatakse järk-järgult statistilist läve. Esialgu nähtavale ilmuv aktivatsiooniala on väike ja fookus paremini määratav. Siiani puuduvad piisavad prospektiivsete uuringute andmed resektsiooni piiride täpse määramise võimaluste kohta aktivatsiooniala ruumilise ulatuse alusel.

Kuigi **motoorsed ja somatosensoorsed keskused** on enamasti edukalt määratavad fMRT-uuringul, võib kasvajate korral täheldada aktivatsiooni vähenemist ja dislokatsiooni (9) (vt jn 4). Infiltreerivate kasvajate korral on täheldatud intratumoroosset aktivatsiooni, mis on hajutatud ja dislotseeritud olenevalt infiltratsiooni astmest; mitteinfiltreerivad kasvajad põhjustavad enamasti ekstratumoroosset dislokatsiooni.

Lisaks sellele täheldatakse sensorimootorse ajukoore reorganisatsiooni ja aktivatsiooni vastashemisfääris, samuti rohkenenud aktivatsiooni mitteprimaarsetes abistavates keskustes (10). Need nähud on korrelatsioonis pareesi raskusastmega. Funktsionaalne reorganisatsioon kajastab aju neuronaaelse võrgustiku plastilisust kompenseerida mootorset ja sensoorset defitsiiti patoloogia korral. Viimasel ajal on kasutatud fMRT-uuringuid kombinatsioonis difusioonitraktograafiaga, mis võimaldab valgeaine traktide visualiseerimist ja paremat massefekti põhjustava patoloogia piiritlemist.

Preoperatiivne fMRT on näidustatud, kui neuroloogiline sümptomatoloogia viitab mootorse ja somatosensoorse ajukoore kahjustusele, kuid morfoloogiline leid on ebamäärane. Arvesse tulevad järgmised põhjused (4):

- Tuumori tõttu pole tsentraalkäärud selgelt identifitseeritavad. fMRT võimaldab sel juhul somatotoopset mootorset ja somatosensoorset funktsionaalset lokaliseerimist pre- ja posttsentraalkäärus nii käe, jala kui ka näo keskuste osas.
- Tsentraalkäärud on morfoloogiliselt nähtavad, kuid käe keskuse anatoomilised orientiirid pole selgelt eristatavad.

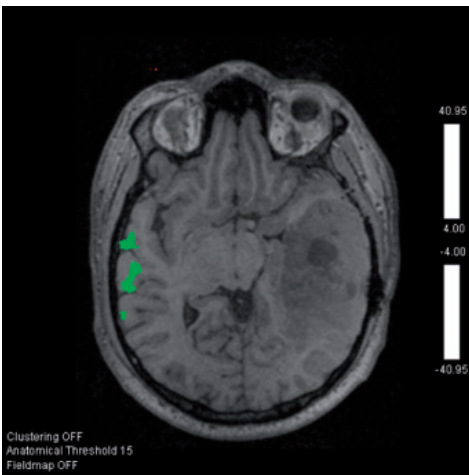


Joonis 4. fMRT vasema F-P piirkonna kasvajaga patsiendil: motoorne test mõlema käega – vasemal motoorne keskus kasvaja poolt dislotseeritud, aktivatsiooniala väiksem kui paremal. Aktiveerunud ka koordinatsioonikeskused väikeajus.

- Tuumor lokaliseerub vahetult käe keskuse kohal või allpool seda. Sel juhul aitab fMRT-uuring kindlaks teha jala ja näo motoorse keskuse.
- Preoperatiivne fMRT on kasulik, kui radioloogiline leid ja kliiniline neuroloogiline sümptomaatika pole kooskõlas, nt kui neuroloogiline leid on vähene, kuid kasvaja ulatub radioloogilise leiu alusel tsentraalkäärude piirkonda. Sel juhul on oodata atüüpilist ajuaktivatsiooni plastiliste protsesside ja reorganiseerumise tagajärjel. Sama kehtib ka retsidiivtuumorite korral, kus funktsionaalne süsteem on juba kahjustatud eelneva ravi käigus.

Tuleb silmas pidada, et fMRT-uuring ei anna infot selle kohta, milline on funktsionaalne defitsiidi risk pärast operatsiooni tsentraalkäärude piirkonnas.

Preoperatiivne **kõnefunktsiooni uuring** tehakse eesmärgiga lokaliseerida Broca ja Wernicke keskus kas ajukasvaja või muu opereeritava patoloogia suhtes, et vältida postoperatiivset kõne defitsiidi teket ning kindlaks määrata kõne hemisfäärne dominantsus (vt jn 5). Viimati toodud näidustuse korral tehakse kõnekeskuse uuringuid eelkõige enne epilepsia kirurgilist ravi (11).



Joonis 5. fMRT vasema oimusagara kasvajaga patsiendil: lausete tähenduse mõistmine – Wernicke keskus aktiveerunud paremal. Operatsiooni järel kõnehäiret ei tekkinud.

Erinevalt motoorsetest keskustest ei ole kõnekeskused radioloogilistel uuringutel vasemal alumises frontaalkäärus ja ülemises temporaalkäärus anatoomiliselt kuigi selgelt eristatavad. Pealegi ei peegelda klassikaline kõnefunktsiooni mudel kogu kõnefunktsiooni kompleksust (12). Kõneprotsessis on haaratud mitmed komponendid: spetsiifiline sensoorne süsteem, fonoloogia, sõnade ja lausete tähenduse mõistmine, süntaks, kirjaliku ja suulise kõne produktsioon jt. Kõnefunktsiooni kompleksus eeldab, et kasutatakse erinevaid paradigmasid erinevate lingvistiliste komponentide uurimiseks ja diagnostilise usaldatavuse suurendamiseks. Kuna kõne uurimiseks universaalsed paradigmad puuduvad, kasutatakse sageli oma väljatöötatud meetodikat. Aktivatsioonialad kõnetestidel erinevad oluliselt olenevalt katsemudelist (lingvistiline aktivatsioon, kontrolltest, järeletoetus).

Kõnefunktsiooni hemisfäärse dominantsuse hindamiseks loendatakse aktiveeruvad voksliid kõnega seotud piirkondades mõlemas hemisfääris kindla statistilise läve juures ja seejärel arvutatakse lateraliseerimise indeksid. Erinevate paradigmade kasutamisel pole tulemused alati identsed, kuid siiski ühilduvad. On teada, et BOLD-aktivatsiooni vahetõde hemisfääride vahel võib muutuda, kui stimuleerimise sagedus muutub, ja seda isegi sama paradigma juures. Sellist nähtust seletatakse aju töökoormusega testimisel (*cerebral workload*) (4). Seega on fMRT-uuringu tulemused teatavas mõttes suhtelised, poolkvantitatiivsed. Siiski võib preoperatiivne fMRT paljudel juhtudel asendada invasiivseid diagnostilisi uuringuid (Wada test, ehk kortikograafia) (11, 13).

Erinevalt motoorse funktsiooni uuringust nõuab kõneuuring märksa tihedamat uurija ja patsiendi koostööd ning eeltreeningut, et saavutada usaldusväärne tulemus. Patsientide valikul preoperatiivseks kõneuuringuks fMRT abil on määrava tähtsusega kliinilised ja neuropsühholoogilised sümptomid. Põhilised näidustused on (4) järgmised:

- ajukasvajaga patsiendid kõnehäirega (ka parema hemisfääri kasvajaga), kuna siin

võib eeldada atüüpilist kortikaalset reorganiseerimist;

- kõnehäireta patsiendid, kellel tuumor lokaliseerub vasemas hemisfääris klassikaliste kõnekeskuste piirkonnas (alumine frontaalkäär ja ülemine oimukäär);
- vasemakäelised patsiendid, ka parema hemisfääri kasvaja korral;
- kakskeelsed patsiendid.

Arvestades võimalikku atüüpilist kortikaalset organiseerimist ja patoloogias tingitud neuroplastilisi muutusi, aitab preoperatiivne fMRT kombinatsioonis difusioonitraktograafiaga paremini planeerida kirurgilist tegevust, et maksimaalselt säilitada olemasolevat funktsiooni (14).

Käsitletud kliiniliste kasutusala kõrval on funktsionaalne MRT laialdast rakendust leidnud neuroteadustes, kus ta on kujunenud populaarseks uurimisvaldkonnaks. Komplitseeritud katsemudelite ja mitme eriala spetsialistide koostöös on saadud palju uusi teadmisi erinevate ajufunktsioonide kortikaalse organiseerimise kohta.

KOKKUVÕTE

MRT uus kasutusala fMRT võimaldab mitteinvasiivselt lokaliseerida spetsiifi-

lisi kortikaalseid funktsioone ajus, kasutades ajuaktivatsiooni tekkivate hemodünaamiliste muutustega kaasnevat sisemist kontrasti. Ajukeskuste aktiveerimiseks kasutatakse erinevaid teste olenevalt uuringu eesmärgist. Kliinilistes uuringutes kasutatakse enam motoorseid ja kõneteste. Funktsionaalne kuvamine MRT abil annab lisaks tavauuringutele unikaalset infot, mida saab kasutada kliinilises töös kirurgilise ravi planeerimisel, et vältida tähtsate keskuste kahjustust operatsioonil. Samuti on fMRT-uuringud näidanud aju suurt plastilisust mitmesuguste patoloogiliste protsesside korral ja seoses rehabilitatsiooniga. Kliinilise rakendamise kõrval on fMRT laialdasemat kasutamist leidnud neuroteaduste valdkonnas, mis eeldab erinevate erialade spetsialistide koostööd ja teadmisi nii neuroanatomias, neurofüsioloogias, neuroloogias, neuropsühholoogias kui ka neuroradioloogias. Võib öelda, et fMRT on avanud laialdasel võimalusel ajutegevuse eksperimentaalseks uurimiseks nii normaalsetes tingimustes kui ka patoloogia korral.

Tiiu.tomborg@kliinikum.ee

KIRJANDUS

1. Ogawa S, Lee TM, Nayak AS, et al. Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields. *Magn Reson Med* 1990;14(1):68–78.
2. Turner R, Le Bihan D, Moonen CT, et al. Echo-planar time course MRI of cat brain oxygenation changes. *Magn Reson Med* 1991; 22(1):159–166.
3. Kwong KK, Belliveau JW, Chesler DA, et al. Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proc Natl Acad Sci USA* 1992;89(12):5675–9.
4. Stippich C, ed. *Clinical functional MRI*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2007.
5. Houghton VM, Moritz C, Meyerand EE, et al. Mapping brain function with functional magnetic resonance imaging. In: Latchaw RE, Kucharczyk J, Moseley ME, eds. *Imaging of the nervous system. Diagnostic and therapeutic applications*. Vol. 2. Philadelphia: Elsevier Mosby; 2005. Pp. 89–100.
6. Friston KJ, Jezzard P, Turner R. The analysis of functional MRI time-series. *Hum Brain Mapp* 1994;1:153–71.
7. Friston KJ, Holmes AP, Worsley KJ, et al. Statistical parametric maps in functional imaging: a general linear approach. *Hum Brain Mapp* 1995;2:189–210.
8. Engström M, Ragnehed M, Lundberg P, Söderfeldt B. Paradigm design of sensory-motor and language tests in clinical fMRI. *Neurophysiologie Clinique* 2004;34:267–77.
9. Atlas SW, Howard RS 2nd. Functional magnetic resonance imaging of regional brain activity in patients with intracerebral gliomas: findings and implications for clinical management. *Neurosurgery* 1996;38(2):329–38.
10. Carpentier AC, Constable RT, et al. Patterns of functional magnetic resonance imaging activation with structural lesions in the rolandic region: a classification system. *J Neurosurg* 2001;94(6):946–54.
11. Santiago Medina L, Bernal B, Ruiz J. Role of functional MR in determining language dominance in epilepsy and nonepilepsy populations: a bayesian analysis. *Radiology* 2007;242:94–100.
12. Bookheimer S. Functional MRI of language: new approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. *Annu Rev Neurosci* 2002;25:151–188.
13. Abou-Khalil B. An update on determination of language dominance in screening for epilepsy surgery: the Wada test and newer noninvasive alternatives. *Epilepsia* 2007;48:442–55.
14. Powell HWR, Parker GJM, Alexander DC, et al. Abnormalities of language networks in temporal lobe epilepsy. *NeuroImage* 2007;36:209–21.

SUMMARY

Functional magnetic resonance imaging

Functional magnetic resonance imaging (fMRI) is a non-invasive imaging technique for localizing brain activity. Brain function is assessed indirectly via detection of local haemodynamic changes in response to specific stimulation of the respective neurofunctional system. fMRI enables to obtain unique functional information, which can be used in clinical work when planning operative treatment, and in rehabilitation. The main clinical applications of fMRI are presurgical localizing of motor and language function in patients with brain tumours and epilepsies, as well as lateralizing language function. For this purpose, different motor and linguistic paradigms are used.

Functional MRI studies have revealed extensive cortical reorganisation in presence of different focal lesions.

Functional neuroimaging has opened up a new research field in neuroscience and has broadened the understanding of how cortical functions are organized in normal brain and in pathology. Experimental work in this field presumes cooperation of different specialists as well as the knowledge of neuroanatomy, neurophysiology, neurology, neurosurgery, neuropsychology, and neuroradiology. Abundant original literature published on functional neuroimaging confirms the popularity of neuroscientific studies in this field.