

# Nabij-infrarood spectroscopie (NIRS) in de klinische anesthesiologie

M. Poterman, Drs.  
T.W.L. Scheeren, Prof. Dr.  
A.F. Kalmar, Dr.

Afdeling anesthesiologie, Rijksuniversiteit Groningen, Universitair Medisch Centrum Groningen, Groningen.

#### CONTACTINFORMATIE

M. Poterman  
Afdeling anesthesiologie  
Universitair Medisch Centrum Groningen  
PO Box 30 001  
9700 RB Groningen  
T +31 (0) 50 3616161  
Email [m.poterman@umcg.nl](mailto:m.poterman@umcg.nl)

#### DISCLOSURE:

Er zijn geen financiële disclosures.

## Introductie

Het primaire doel van hemodynamische ondersteuning bij patiënten is het behouden, herstellen of optimaliseren van een adequate zuurstofvoorziening voor het aerobe metabolisme [1, 2]. Het blijft echter een uitdaging om weefseloxygenatie in de dagelijkse klinische praktijk te bepalen. Occulte regionale ischemie, dat wil zeggen niet waarneembaar op systemische niveau, wordt beschouwd als een belangrijke oorzaak van morbiditeit en mortaliteit na een groot trauma en in andere ernstig zieke patiënten [3]. Meetmethodes, die de vroege detectie van regionale hypoxie en vervolgens de behandeling hiervan mogelijk maken, zijn daarom van groot belang. Anderzijds groeit het besef dat bij het optimaliseren van de weefseloxygenatie niet simpelweg het meer-is-beter principe geldt, maar dat het nastreven van supranormale waarden ook nadelige gevolgen kan hebben. Daarom dient therapie om de zuurstofvoorziening te optimaliseren gericht te worden op specifieke oxygenatie doelen, zoals regionale oxygenatie streefwaarden. Dit maakt monitoring essentieel.

In de dagelijkse klinische praktijk kunnen anesthesiologen tegenwoordig op een verscheidenheid van meettechnieken rekenen om cardiovasculaire functies en globale zuurstofvoorziening te kwantificeren. Het routinematig meten van de regionale weefseloxygenatie was tot recent niet mogelijk. Weefseloxygenatie kan reeds

lang gemeten worden met experimentele methoden, die ofwel invasief of afhankelijk zijn van toxische middelen. Deze zijn dus minder geschikt voor de klinische praktijk. In de afgelopen decennia zijn een aantal veelbelovende technieken geïntroduceerd die potentieel kunnen worden ingezet in de dagelijkse routine. De in de kliniek meest gebruikte techniek is nabij-infrarood spectroscopie (NIRS).

## Werkingsprincipe van NIRS

NIRS is een niet-invasieve meettechniek voor oxygenatie, die is gebaseerd op de verandering van optische eigenschappen van specifieke biologische moleculen door binding met zuurstof [4]. Iedereen weet uit eigen ervaring dat geoxygeneerd bloed helder rood is, en gedeoxygeneerd bloed veel donkerder. Dit is het gevolg van een verschillende lichtabsorptie in het zichtbaar spectrum in functie van de zuurstofsaturatie van hemoglobine. Dit principe wordt reeds lang gebruikt bij pulse-oxymetrie waar twee of drie specifieke golflengtes worden gebruikt om in combinatie met de pulse plethysmografie de arteriële zuurstofsaturatie te meten. Zichtbaar licht kan echter enkel over korte afstanden de weefsels penetreren, terwijl fotonen met een iets langere golflengte (Nabij-infrarood (NIR) van 700 tot 1100 nm) meerdere centimeters door weefsels en zelfs bot doordringen. Dat laatste is belangrijk voor transcraniële cerebrale oxymetrie [5].

De probe van een NIRS sensor wordt op een geschikte plaats op de huid bevestigd. In deze probe bevindt zich een lichtbron die (intermitterend) NIR licht uitstraalt van verschillende specifieke golflengtes. De lichtstralen (in de vorm van fotonen) gaan door de weefsels en worden onderweg verstrooid en geabsorbeerd door onder andere geoxygeneerd en gedeoxygeneerd hemoglobine, waarvan het absorptiespectrum varieert volgens de oxygenatie van deze pigmenten (zie Figuur 1). Een detector in dezelfde probe meet de hoeveelheid licht van elk van de gebruikte golflengtes dat opnieuw aan de oppervlakte verschijnt. Systemen om de oxygenatie op een specifieke diepte te meten (zoals voor cerebrale oxymetrie) bestaan uit meerdere sensoren op verschillende afstand van de lichtbron (zie Figuur 2). Dit is gebaseerd op het principe dat licht dat dieper is gepenetreerd op grotere afstand terug aan de oppervlakte komt dan licht dat enkel door de oppervlakkige weefsels is gegaan. De intensiteit en golflengte van het gebruikte licht is niettemin zo zwak dat het als volstrekt ongevaarlijk mag worden beschouwd. De laatste jaren is NIRS geëvolueerd van experimenteel instrument tot een gamma monitors met brede toepassingsgebieden: specifieke monitors zijn onder meer ontwikkeld voor cerebrale oxymetrie, perifere oxymetrie en neonatale monitoring tot zelfs een zakformaat SpotCheck monitor (Hutchinson) voor perifere weefseloxygenatie.

## NIRS meetpunten

NIRS werd oorspronkelijk geïntroduceerd in de klinische praktijk in 1985, voor de beoordeling van cerebrale oxygenatie bij premature zuigelingen [7]. Het meten van de cerebrale oxygenatie is nog steeds de meest gebruikte toepassing. Aangezien NIR licht gemakkelijk de schedel kan penetreren kan de frontale corticale oxygenatie makkelijk worden bepaald door zelfklevers op het voorhoofd. De meetwaarden reflecteren voornamelijk de oxygenatie van de grijze stof in de cerebrale cortex.

Theoretisch kan een NIRS sensor overal worden aangebracht, maar de onderliggende musculatuur is bepalend voor de meest geschikte locaties voor perifere weefseloxygenatie. De duimmuis wordt vaak gebruikt omdat hier een relatief dunne vetlaag zit in vergelijking met andere regio's. Bovendien is wefselfoedeem hier relatief minder uitgesproken en is er ook bij mensen met een donkere huid weinig pigmentatie op de handpalmen. Aangezien de onderarm (inclusief duimmuis) in geval van circulatoire bedreiging een snellere en meer uitgesproken vasoconstrictie ondergaat dan andere lichaamsregio's, is dit een geschikte locatie voor perifere NIRS meting [8, 9].

## Aannames en beperkingen bij NIRS

Zoals bij elk monitoringstelsel is het essentieel voor de clinicus om naast de onderliggende technologie ook op de hoogte te zijn van de beperkingen en de aannames die gedaan zijn om de gemeten signalen te vertalen naar een klinisch betekenisvolle variabele. Ondanks de significante technologische vooruitgang in de laatste jaren zijn er toch nog een aantal belangrijke beperkingen aan gebonden. De meetmethode is gebaseerd op lichtabsorptie door specifieke biologische moleculen, zoals hemoglobine, waardoor de evidente vraag ontstaat in welke mate andere moleculen de meting verstoren. Huidpigmentatie zou hierin een rol kunnen spelen.

Ten tweede, de algoritmes voor de berekening van de oxygenatie gaan uit van een vaste afstand die het NIR licht

aflegt door het meetgebied (weefsel). Verschillende weefselcomponenten veroorzaken echter een verschillende mate van fotonverstrooiing en absorptie. Hierdoor resulteren variatie in de positionering van de probe [10] enerzijds en de interindividuele variatie in de samenstelling van het weefsel anderzijds tot 10-15% variabiliteit in de daadwerkelijk afgelegde afstand van het NIR licht [11]. Bovendien staat de invloed van extracraniaal weefsel al enige tijd ter discussie [6].

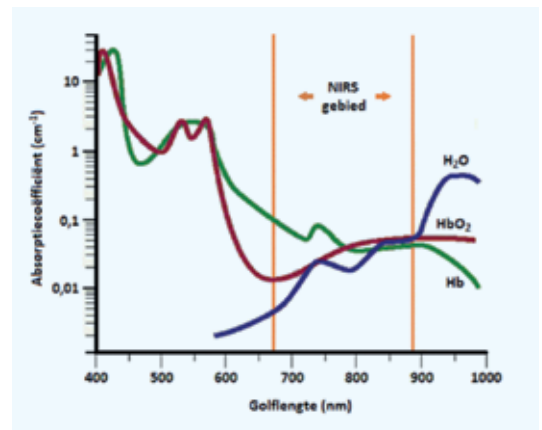
Een derde punt is de bijdrage van myoglobine, gezein hemoglobine en myoglobine gelijkaardige absorptiespectra hebben. Omdat de affiniteit van zuurstof voor myoglobine beduidend sterker is dan voor hemoglobine zal myoglobine nog een relatief sterke saturatie hebben in geval van hypoperfusie en hypoxie [12]. Indien de sensor dus geen onderscheid kan maken tussen het effect van myoglobine versus hemoglobine kan dit een overschatting geven van de hemoglobine saturatie. Verder zijn de disposable sensoren relatief duur, en zijn er voor de meerderheid van de potentiële indicaties nog geen conclusieve kosten/baten studies verricht.

## Cerebrale NIRS monitoring

Er is een uitgebreide en nog steeds groeiende literatuur over het gebruik van NIRS in klinische anesthesiologie. Hoewel de initiële studies zich voornamelijk richtten op NIRS als cerebrale neuromonitor tijdens neurochirurgie en cardiovasculaire chirurgie, breidt de interesse zich nu uit naar andere chirurgische gebieden en klinische situaties en naar de evaluatie van de oxygenatie van andere weefsels dan de hersenen.

## Hypovolemie

Bij ernstige hypovolemie ontstaat er een belangrijke redistributie van bloedvolume en perfusie naar de vitale organen (vooral hart en hersenen). In een dergelijk geval kan manifeste regionale hypoperfusie optreden zelfs wanneer systemische variabelen (zoals bloeddruk of pulse oximetrie) normaal blijven. In die gevallen kan NIRS gebruikt worden om het vochtbeleid te sturen.



Figuur 1 Verschillende absorptiespectra voor water (H<sub>2</sub>O), geoxigeneerd (HbO<sub>2</sub>) en gedeoxigeneerd hemoglobine (Hb). NIRS meet de lichtabsorptie van de verschillende golflengtes binnen het NIR-gebied om de verhouding HbO<sub>2</sub>/Hb in de weefsels te bepalen.

Anderzijds heeft ook inductie van anesthesie een belangrijke invloed op de mate van perifere vasoconstrictie en redistributie (relatieve hypovolemie). Bij de veranderingen van NIRS waarden tijdens inductie van anesthesie moet hiermee rekening worden gehouden, wat de exacte interpretatie in deze gevallen complex en contro-versieel maakt [13].

In een prospectieve observationele studie bij gezonde vrijwilligers en patiënten op de eerste hulp werd met behulp van een NIRS monitor de wefselfoxygenatie ter hoogte van de duimmuis gemeten, waarbij een veelbelovend verschil werd gevonden tussen de waarden van de patiënten met ernstige shock versus matige shock of gezonde vrijwilligers [1]. Of deze bevindingen ook van toepassing kunnen zijn in het diagnostisch of therapeutisch beleid moet echter nog verder onderzocht worden. Tevens is aangetoond dat patiënten die in staat zijn om hun perifere wefselfoxygenatie boven de 75% te houden een minder grote kans hebben op het ontwikkelen van orgaanfalen of overlijden na een ernstig trauma [14, 15].

## Cardiale chirurgie

Aangezien de incidentie van neurologische complicaties vooral bij cardiale chirurgie erg hoog is [16, 17], is de mogelijkheid om op een simpele, niet-invasieve manier het brein te monitoren zeer aantrekkelijk voor de cardiothoracale anesthesioloog.

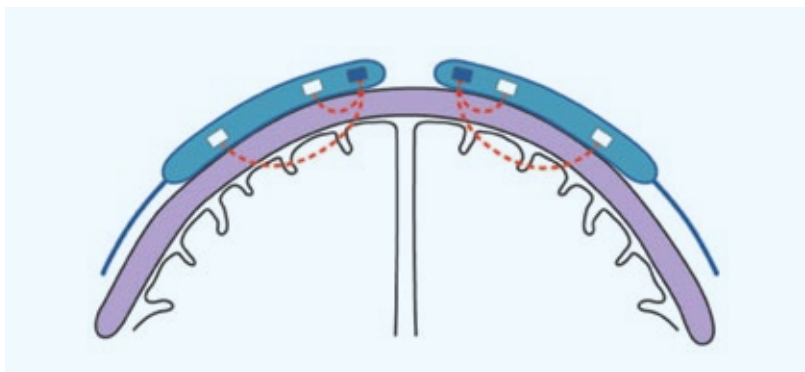
Cerebrale oxygenatie waarden (INVOS®, Covidien) blijken goed te correleren met bulbus jugularis saturatie [18]: waarden van 55% tot 80% worden als normaal gezien en absolute waarden van <50% of een daling van 20% ten opzichte van de uitgangswaarde worden in het algemeen als interventiedrempel beschouwd.

In congenitale en pediatrie cardiale chirurgie wordt NIRS al lange tijd ingezet als deel van neuroprotectieve monitoring, omdat ontregeling in de cerebrale hemodynamiek en oxygenatie hier frequent voorkomen. Door de vroege detectie van hypoxie kan mogelijk postoperatieve cerebrale schade voorkomen worden [19-21].

De belangstelling voor NIRS heeft zich ook vlot uitgebreid naar de cardiale chirurgie voor volwassenen. In verschillende observationele studies is aangetoond dat routine cerebrale NIRS monitoring in perioperatieve setting de incidentie van postoperatieve neurologische complicaties verlaagt en de opnameduur vermindert [22-25]. Echter, om de inzet van nieuwe meettechnologieën te rechtvaardigen is het belangrijk om aan te tonen dat interventies, die gebaseerd zijn op die technologie, effectief de klinische uitkomst van patiënten verbetert. Drie grote interventionele trials demonstreerden minder cerebrale vasculaire accidenten, kortere duur van postoperatieve ventilatie en kortere opnameduur wanneer perioperatieve cerebrale NIRS monitoring werd ingezet en oxygenatiewaarden behouden of hersteld werden [26-28].

### Niet-cardiale chirurgie

Tot nu toe is er slechts weinig bekend over de waarde van cerebrale NIRS monitoring tijdens niet-cardiale chirurgie. Echter, een gerandomiseerde studie met 122 oudere patiënten voor een grote abdominale ingreep toonde minder cognitieve achteruitgang en een korter ziekenhuisverblijf in de interventie groep (cerebrale oxygenatie 75% van de uitgangssituatie) versus controlegroep [29].



**Figuur 2** Cerebrale NIRS sensoren op het voorhoofd van de patiënt. Een schematische weergave van de weg die de fotonen afleggen, van de lichtbron (blauw) naar de sensoren (wit), door het oppervlakkige en cerebrale weefsel [6].

Tevens zijn er verschillende studies gedaan naar de rol van cerebrale NIRS monitoring tijdens carotis endarterectomie. Zo werd de NIRS techniek meerdere malen vergeleken met de transcraniële doppler, waarbij NIRS even goed of zelfs beter in staat was cerebrale ischemie tijdens carotis chirurgie te detecteren [30, 31]. Tot slot, er werd geen correlatie gevonden tussen de cerebrale oxygenatie en de bloeddruk tijdens het klemmen van de carotis, wat suggereert dat een stijging van de bloeddruk niet per definitie adequate cerebrale perfusie garandeert [32].

Een andere toepassing van cerebrale NIRS monitoring is tijdens schouderchirurgie in de strandstoelpositie. Tijdens deze operaties kan cerebrale desaturatie uitgelokt worden door meerdere oorzaken waaronder 1) orthostatische hypotensie, 2) manipulatie van het hoofd en de nek leidend tot veranderingen in de cerebrale bloedstroom en 3) door een tromboembolisch proces. Patiënten in de strandstoelpositie maakten significant meer cerebrale desaturaties door dan patiënten in laterale decubitus positie en ervoeren meer postoperatieve misselijkheid en braken. Er werden echter geen neurologische afwijkingen waargenomen [33].

Thoracale chirurgie met één long ventilatie leek te zijn geassocieerd met een significante daling van de cerebrale oxygenatie [34], daarnaast was er een positieve correlatie tussen minimale oxygenatie waarden en postoperatieve complicaties [35].

### NIRS monitoring van niet-cerebrale weefsels

De belangstelling voor het gebruik van NIRS als oximeter voor niet-cerebrale weefsels neemt toe. Regionale oxygenatie metingen op somatische plaatsen is bepleit als vroeg waarschuwingssysteem voor veranderingen in het zuurstofevenwicht tussen vraag en aanbod. Wanneer de cardiac output daalt, neemt de sympathische activiteit toe, waardoor de vaatweerstand verhoogt en er een redistributie optreedt van het bloed naar de hersenen en het hart. Hierdoor ontstaat er een verhoogd ischemie-risico voor andere weefsels. Om deze reden wordt er momenteel veel onderzoek gedaan naar het gebruik van NIRS voor oxygenatie monitoring van de nieren [36, 37], lever [38, 39] en splanchnisch weefsel [36, 40].

Voor bovengenoemde toepassingen is het belangrijk om te beseffen dat de gemiddelde diepte van NIR licht penetratie evenredig is met de lichtbron-detector afstand, maar de exacte diepte van de penetratie van nabij-infrarood licht is niet bekend [41].

Voor een aantal organen is nog maar weinig bewijs dat de monitor daadwerkelijk het doelorgaan meet. Een van de problemen met deze nieuwe toepassingen is dat de veranderingen in oxygenatie van niet vitale organen een te gevoelige marker voor hemodynamische bedreiging zijn en resulteren in een groot aantal onnodige interventies. Toekomstige studies zijn nodig om de klinisch waardevolle applicaties te identificeren.

## Conclusie

NIRS biedt de mogelijkheid om op continue en niet-invasieve wijze de weefseloxygenatie te meten. Een veelvoorkomende toepassing is het meten van de cerebrale oxygenatie. Weefselhypoxie komt frequent voor in perioperatieve setting, vooral in

cardiale chirurgie. Daarom zou het meten en verkrijgen van een adequate cerebrale oxygenatie (postoperatieve) complicaties kunnen voorkomen en dus kosteneffectief kunnen zijn. NIRS monitoring kan ook gebruikt worden voor het detecteren van weefselhypoxie bij niet-cardiale

chirurgie of op de eerste hulp. Tevens biedt NIRS perspectief voor het gebruik op andere locaties dan het voorhoofd, zoals op de duimmuis of somatisch. Optimale streefwaarden en therapeutische strategieën moeten echter nog uitgebreid onderzocht worden.

## REFERENTIES

- Crookes B.A., Cohn S.M., Bloch S. et al. Can near-infrared spectroscopy identify the severity of shock in trauma patients? *J Trauma* 2005; 58: 806-13.
- Schwarte L.A., Schwartges I., Thomas K., Schober P., Picker O. The effects of levosimendan and glibenclamide on circulatory and metabolic variables in a canine model of acute hypoxia. *Intensive Care Med* 2011; 37: 701-10.
- Pohl A., Cullen D.J. Cerebral ischemia during shoulder surgery in the upright position: a case series. *J Clin Anesth* 2005; 17: 463-9.
- Scheeren T.W.L., Schober P., Schwarte L.A. Monitoring tissue oxygenation by near infrared spectroscopy (NIRS): background and current applications. *J Clin Monit Comput* 2012; 26: 279-87.
- Moerman A., Wouters P. Near-infrared spectroscopy (NIRS) monitoring in contemporary anesthesia and critical care. *Acta Anaesthesiol Belg* 2010; 61: 185-94.
- Davie S.N., Grocott H.P. Impact of extracranial contamination on regional cerebral oxygen saturation: a comparison of three cerebral oximetry technologies. *Anesthesiology* 2012; 116: 834-40.
- Brazy J.E., Lewis D.V., Mitnick M.H., Jöbsis vander Vliet F.F. Noninvasive monitoring of cerebral oxygenation in preterm infants: preliminary observations. *Pediatrics* 1985; 75: 217-25.
- Bartels S.A., Bezemer R., de Vries F.J. et al. Multi-site and multi-depth near-infrared spectroscopy in a model of simulated (central) hypovolemia: lower body negative pressure. *Intensive Care Med* 2011; 37: 671-7.
- Soller B.R., Ryan K.L., Rickards C.A. et al. Oxygen saturation determined from deep muscle, not thenar tissue, is an early indicator of central hypovolemia in humans. *Crit Care Med* 2008; 36: 176-82.
- Kishi K., Kawaguchi M., Yoshitani K., Nagahata T., Furuya H. Influence of patient variables and sensor location on regional cerebral oxygen saturation measured by INVOS 4100 near-infrared spectrophotometers. *J Neurosurg Anesthesiol* 2003; 15: 302-6.
- Duncan A., Meek J.H., Clemence M. et al. Optical pathlength measurements on adult head, calf and forearm and the head of the newborn infant using phase resolved optical spectroscopy. *Phys Med Biol* 1995; 40: 295-304.
- Spires J., Lai N., Zhou H., Saidel G.M. Hemoglobin and myoglobin contributions to skeletal muscle oxygenation in response to exercise. *Adv Exp Med Biol* 2011; 701: 347-52.
- Nissen P., van Lieshout J.J., Nielsen H.B., Secher N.H. Frontal lobe oxygenation is maintained during hypotension following propofol-fentanyl anesthesia. *AANA J* 2009; 77: 271-6.
- Cohn S.M., Nathens A.B., Moore F.A. et al. Tissue oxygen saturation predicts the development of organ dysfunction during traumatic shock resuscitation. *J Trauma* 2007; 62: 44-54.
- Ikossi D.G., Knudson M.M., Morabito D.J. et al. Continuous muscle tissue oxygenation in critically injured patients: a prospective observational study. *J Trauma* 2006; 61: 780-8.
- Menache C.C., du Plessis A.J., Wessel D.L., Jonas R.A., Newburger J.W. Current incidence of acute neurologic complications after open-heart operations in children. *Ann Thorac Surg* 2002; 73: 1752-8.
- Newman M.F., Kirchner J.L., Phillips-Bute B. et al. Longitudinal assessment of neurocognitive function after coronary-artery bypass surgery. *N Engl J Med* 2001; 344: 395-402.
- Kim M.B., Ward D.S., Cartwright C.R., Kolano J., Chlebowski S., Henson L.C. Estimation of jugular venous O<sub>2</sub> saturation from cerebral oximetry or arterial O<sub>2</sub> saturation during isocapnic hypoxia. *J Clin Monit Comput* 2000; 16: 191-9.
- Sakamoto T., Duebener L.F., Laussen P.C., Jonas R.A. Cerebral ischemia caused by obstructed superior vena cava cannula is detected by near-infrared spectroscopy. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2004; 18: 293-303.
- Han S.H., Kim C.S., Lim C., Kim W.H. Obstruction of the superior vena cava cannula detected by desaturation of the cerebral oximeter. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2005; 19: 420-1.
- Gottlieb E.A., Fraser C.D., Andropoulos D.B., Diaz L.K. Bilateral monitoring of cerebral oxygen saturation results in recognition of aortic cannula malposition during pediatric congenital heart surgery. *Paediatr Anaesth* 2006; 16: 787-9.
- Yao F.S., Tseng C.C., Ho C.Y., Levin S.K., Illner P. Cerebral oxygen desaturation is associated with early postoperative neuropsychological dysfunction in patients undergoing cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2004; 18: 552-8.
- Olsson C., Thelin S. Regional cerebral saturation monitoring with near-infrared spectroscopy during selective antegrade cerebral perfusion: diagnostic performance and relationship to postoperative stroke. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2006; 131: 371-9.
- Orihashi K., Sueda T., Okada K., Imai K. Near-infrared spectroscopy for monitoring cerebral ischemia during selective cerebral perfusion. *Eur J Cardiothorac Surg* 2004; 26: 907-11.
- Hong S.W., Shim J.K., Choi Y.S., Kim D.H., Chang B.C., Kwak Y.L. Prediction of cognitive dysfunction and patients' outcome following valvular heart surgery and the role of cerebral oximetry. *Eur J Cardiothorac Surg* 2008; 33: 560-5.
- Slater J.P., Guarino T., Stack J. et al. Cerebral oxygen desaturation predicts cognitive decline and longer hospital stay after cardiac surgery. *Ann Thorac Surg* 2009; 87: 36-44.
- Goldman S., Sutter F., Ferdinand F., Trace C. Optimizing intraoperative cerebral oxygen delivery using non-invasive cerebral oximetry decreases the incidence of stroke for cardiac surgical patients. *Heart Surg Forum* 2004; 7: 376-81.
- Murkin J.M., Adams S.J., Novick R.J. et al. Monitoring brain oxygen saturation during coronary bypass surgery: a randomized, prospective study. *Anesth Analg* 2007; 104: 51-8.
- Casati A., Fanelli G., Pietropaoli P. et al. Continuous monitoring of cerebral oxygen saturation in elderly patients undergoing major abdominal surgery minimizes brain exposure to potential hypoxia. *Anesth Analg* 2005; 101: 740-7.
- Ali A.M., Green D., Zayed H., Halawa M., El-Sakka K., Rashid H.I. Cerebral monitoring in patients undergoing carotid endarterectomy using a triple assessment technique. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2011; 12: 454-7.
- Pugliese F., Ruberto F., Tosi A. et al. Regional cerebral saturation versus transcranial Doppler during carotid endarterectomy under regional anaesthesia. *Eur J Anaesthesiol* 2009; 26: 643-7.
- Yao F.S., Tseng C.C., Ho C.Y., Levin S.K., Illner P. Cerebral oxygen saturation is associated with early postoperative neuropsychological dysfunction in patients undergoing cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2004; 18: 552-8.
- Murphy G.S., Szokol J.W., Marymont J.H. et al. Cerebral oxygen desaturation events assessed by near-infrared spectroscopy during shoulder arthroscopy in the beach chair and lateral decubitus positions. *Anesth Analg* 2010; 111: 496-505.
- Hemmerling T.M., Bluteau M.C., Kazan R., Bracco D. Significant decrease of cerebral oxygen saturation during single-lung ventilation measured using absolute oximetry. *Br J Anaesth* 2008; 101: 870-5.
- Kazan R., Bracco D., Hemmerling T.M. Reduced cerebral oxygen saturation measured by absolute cerebral oximetry during thoracic surgery correlates with postoperative complications. *Br J Anaesth* 2009; 103: 811-6.
- Chakravarti S.B., Mittnacht A.J., Katz J.C., Nguyen K., Joashi U., Srivastava S. Multisite near-infrared spectroscopy predicts elevated blood lactate level in children after cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2009; 23: 663-7.
- Ortmann L.A., Fontenot E.E., Seib P.M., Eble B.K., Brown R., Bhutta A.T. Use of near-infrared spectroscopy for estimation of renal oxygenation in children with heart disease. *Pediatr Cardiol* 2011; 32: 748-53.
- Weiss M., Schulz G., Fasnacht M. et al. Transcutaneously measured near-infrared spectroscopic liver tissue oxygenation does not correlate with hepatic venous oxygenation in children. *Can J Anaesth* 2002; 49: 824-9.
- Mitsuta H., Ohdan H., Fudaba Y. et al. Near-infrared spectroscopic analysis of hemodynamics and mitochondrial redox in right lobe grafts in living-donor liver transplantation. *Am J Transplant* 2006; 6: 797-805.
- Kaufman J., Almodovar M.C., Zuk J., Friesen R.H. Correlation of abdominal site near-infrared spectroscopy with gastric tonometry in infants following surgery for congenital heart disease. *Pediatr Crit Care Med* 2008; 9: 62-8.
- Mansouri C., L'Huillier J.P., Kashou N.H., Humeau A. Depth sensitivity analysis of functional near-infrared spectroscopy measurement using three-dimensional Monte Carlo modelling-based magnetic resonance imaging. *Lasers Med Sci* 2010; 25: 431-8.