

Monitorowanie regionalnej saturacji mózgowej podczas zabiegów kardiochirurgicznych – algorytm postępowania



Application of cerebral oximetry in adult cardiovascular surgery – management protocol

Ewa Kucewicz-Czech¹, Ewa Urbańska¹, Piotr Wolski², Piotr Knapik¹, Jarosław Borkowski¹, Ewa Podwińska³

¹Oddział Kliniczny Kardioanestezji i Intensywnej Terapii Śląskiego Uniwersytetu Medycznego, Śląskie Centrum Chorób Serca w Zabrzu

²Instytut Kardiologii w Warszawie

³Katedra Anestezjologii, Intensywnej Terapii i Medycyny Ratunkowej w Zabrzu

Kardiochirurgia i Torakochirurgia Polska 2011; 4: 504–508

Streszczenie

Oksymetria mózgowa jest metodą ciągłego pomiaru regionalnego wysycenia hemoglobiny tlenem ośrodkowego układu nerwowego (OUN). Urządzenie INVOS rejestruje trendy zmienności saturacji (rSO_2) w czasie. Częstość występowania ciężkich powikłań neurologicznych po zabiegach kardiochirurgicznych szacuje się na 6%. Należą do nich udary niedokrwienne (ogniskowe/globalne, np. encefalopatia). Drugą grupę stanowią zaburzenia poznawcze (np. zespoły majaczeniowe). Na podstawie dostępnych badań można z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że optymalizacja bilansu tlenowego OUN ocenianego na podstawie rSO_2 pozwala zmniejszyć częstość występowania wszystkich powikłań neurologicznych po zabiegach kardiochirurgicznych. Przedstawiono protokół postępowania śródoperacyjnego, którego celem jest utrzymanie rSO_2 na zaplanowanym poziomie.

Słowa kluczowe: oksymetria mózgowa, operacje kardiochirurgiczne, udar ośrodkowego układu nerwowego.

Udar ośrodkowego układu nerwowego (OUN) jest dramatycznym powikłaniem zabiegów kardiochirurgicznych. Implikuje niewydolność innych narządów, wydłuża czas pobytu w szpitalu, zwiększa koszty leczenia i jest przyczyną wzrostu śmiertelności. Częstość występowania ciężkich powikłań neurologicznych (udar) w kardiochirurgii szacuje się na 6% [1]. Etiologia udarów jest złożona. Zidentyfikowano istotne przedoperacyjne czynniki ryzyka, do których należą: wiek, choroba naczyń obwodowych, niewydolność nerek, cukrzyca, stopień zaawansowania choroby serca. Powstały

Abstract

Cerebral oximetry is a noninvasive technology that continuously monitors cerebral tissue oxygen saturation, which is sensitive index of global cerebral hypoperfusion. The INVOS is approved as a trend-only cerebral oximeter. There are 2 different forms of brain injury that may occur after cardiac surgery – neurological dysfunction (focal or global neurological injury) and neurocognitive dysfunction (postoperative confusion, agitation, delirium). Patients who underwent all cardiac surgeries with optimized cerebral oxygen delivery demonstrated lower incidence of permanent stroke and cognitive dysfunction. We present the intraoperative management protocol designed to maintain rSO_2 values at or above 80% of the pre-induction baseline.

Key words: cerebral oximetry, cardiac surgery, stroke.

skale przewidywania udaru OUN oparte na przedoperacyjnych czynnikach ryzyka, które na wielu oddziałach funkcjonują w codziennej praktyce. Od kilku miesięcy w Śląskim Centrum Chorób Serca w Zabrzu stosuje się te skale w celu oceny ryzyka wystąpienia udaru OUN, niewydolności nerek i przedłużonej wentylacji mechanicznej płuc we wczesnym okresie pooperacyjnym. Pozostałe czynniki ryzyka udaru dotyczą okresu śród- i pooperacyjnego. Powtarzalnym w wielu analizach klinicznych śródoperacyjnym czynnikiem ryzyka jest wydłużony czas krążenia pozaustrojowego. Hipotezy

Adres do korespondencji: dr hab. n. med. Ewa Kucewicz-Czech, Oddział Kliniczny Kardioanestezji i Intensywnej Terapii SUM, ul. M. Curie-Skłodowskiej 9, 41-800 Zabrze, e-mail: kardanest@sum.edu.pl

dotyczące ryzyka udaru we wczesnym okresie pooperacyjnym nie są zbadane, choć powszechnie wiadomo, że migotanie przedsionków zwiększa częstość udarów. Urazy zdarzają się u chorych z małym lub średnim przedoperacyjnym ryzykiem ich wystąpienia. Powstaje więc sugestia, że części z tych powikłań można uniknąć [2]. Na podkreślenie zasługuje cytowana w wielu pracach badawczych opinia, że ponad 50% chorych kwalifikowanych do operacji pomostowania tętnic wieńcowych ma zmiany miażdżycowe w naczyniach wewnątrz- lub zewnątrzczaszkowych [3].

Nie mniejszym problemem okresu pooperacyjnego są zaburzenia poznawcze. Taki zespół objawów obserwuje się u 30–62% operowanych pacjentów [4]. Dostępne są badania, które informują o występowaniu tego powikłania nawet u 79% pacjentów po przebytych zabiegach kardiologicznych [1]. Najczęściej przytaczaną etiologią pooperacyjnych zaburzeń poznawczych jest mikroizatorowość i hipoperfuzja mózgu. Poza tym wśród przyczyn wymienia się także: uogólnioną reakcję zapalną, zaawansowany wiek, niski poziom edukacji, cukrzycę, ciężką, uogólnioną miażdżycę i rodzaj wykonanego zabiegu kardiologicznego. Zaburzenia poznawcze diagnozowane we wczesnym okresie pooperacyjnym (moment zakończenia hospitalizacji) są czynnikiem ryzyka utrzymania się objawów przez kolejne 5 lat [5].

Należy podkreślić, że te same procesy, które uszkadzają mózg, powodują dysfunkcję innych narządów. Zakładając, że utrzymanie optymalnego bilansu tlenowego OUN stwarza takie same warunki innym organom, można potraktować mózg jako narząd reprezentujący homeostazę całego organizmu (ang. *index organ*). Wszystkie interwencje mające na celu poprawę regionalnej saturacji mózgowej (rSO_2) oddziałują w ten sam sposób na utlenowanie innych tkanek i narządów. Spodziewanym efektem jest ograniczenie powikłań pooperacyjnych [3].

Wprowadzenie technik operacyjnych niewymagających zastosowania krążenia pozaustrojowego [pomostowanie tętnic wieńcowych bez zastosowania krążenia pozaustrojowego (ang. *off-pump coronary artery bypass* – OPCAB), mało inwazyjne pomostowanie tętnic wieńcowych (ang. *minimally invasive direct coronary artery bypass* – MIDCAB)] nie wyeliminowało powikłań neurologicznych. Prowadzone badania neurofizjologiczne wskazują, że przyczyną pooperacyjnych powikłań neurologicznych są hipoperfuzja i dysoksygenacja [6]. Wymienione zaburzenia są możliwe do identyfikacji i korekcji w czasie trwania zabiegu, co wprost sugeruje przydatność śródoperacyjnego monitorowania funkcji mózgu. Jedną z dostępnych metod jest elektroencefalografia (EEG). Zmiany zapisu EEG są różnorodne i odzwierciedlają wpływ anestezji na funkcję OUN. Metoda wykazuje wysoką czułość w stosunku do funkcji synaps i niską swoistość w zakresie zmian patologicznych. W piśmiennictwie można znaleźć próby zastosowania EEG w śródoperacyjnym monitorowaniu funkcji OUN, ale wyniki nie są zachęcające [6]. Pewnym problemem jest także oprzyrządowanie. Urządzenie diagnozujące wymaga zapisu w systemie 16 kanałów. Monitorowanie śródoperacyjnie korzysta z 4 kanałów. Okres

krążenia pozaustrojowego generuje artefakty. Szczególnie trudna interpretacja dotyczy okresu hipotermii.

Drugą metodą używaną do śródoperacyjnego monitorowania funkcji OUN jest przezczaszkowa ultrasonografia dopplerowska. Oknem diagnostycznym, które umożliwia monitorowanie przepływu w dużych naczyniach mózgowych, uzależnionego w różny sposób od średnicy naczynia, jest okolica skroniowa. Hemodylucja ma wpływ na wynik badania. Zatory powietrzem i innym materiałem są łatwo rozpoznawalne.

Aplikacja widma światła w wiązce podczerwieni umożliwia ciągłe, nieinwazyjne, przyłożkowe monitorowanie rSO_2 . Czaszka ludzka jest łatwo przenikalna dla podczerwieni. Spektroskopia bliskiej podczerwieni (ang. *near-infrared spectroscopy* – NIRS) wykorzystuje absorpcję światła podczerwonego przez chromofory (pierścień pirolowy hemoglobiny wiążący atom żelaza). Ferrari i wsp. [7] w latach 80. wskazali na możliwość pomiaru światła odbitego i rozproszonego powracającego po łuku w okolicę źródła emisji.

Metoda wykorzystuje 1 generator i 2 detektory podczerwieni. Detektor bliższy odbiera fotony odbite od tkanek powierzchniowych (skóra, tkanka podskórna), detektor dalszy – odbite i częściowo pochłonięte przez korę mózgu. Umieszczenie elektrod obustronnie w okolicy czołowo-skroniowej gwarantuje pomiar oksygenacji kory mózgowej w rejonach granicznych, zaopatrywanych przez tętnicę przednią i środkową mózgu – szczególnie narażone na ograniczenie perfuzji. Rejestracja jest prowadzona obustronnie, z prawej i lewej półkuli. W przeciwieństwie do szeroko stosowanej pulsoksymetrii, NIRS dokonuje odczytu oksygenacji w naczyniach bez uwzględnienia pulsacji. Ocenia utlenowanie hemoglobiny we krwi żyłnej i tętniczej. Stosunek krwi tętniczej do żyłnej w mózgu wynosi 15 : 85, co oznacza, że metoda podaje wartość saturacji żyłnej [8]. Regionalna saturacja mózgowa odzwierciedla bilans tlenowy mózgu (różnica między dostarczeniem a zużyciem tlenu).

Ocena utlenowania następuje w czasie rzeczywistym, z opóźnieniem 10 s (okres gromadzenia i uśredniania danych). Metoda wymaga wyznaczenia linii bazowej przed indukcją znieczulenia. Wykładnikiem niedokrwienia mózgu jest w większym stopniu odchylenie od linii bazowej niż bezwzględna wartość rSO_2 . Należy podkreślić, że wartość bazowa z wysoką czułością i swoistością określa dodatkowo funkcję serca. Pacjenci z niską wartością bazową rSO_2 dysponują ograniczoną rezerwą i niewielkimi możliwościami kompensacji w przypadku obniżenia ciśnienia systemowego, rzutu serca, niedotlenienia czy innych konsekwencji urazu operacyjnego. Możliwości zwiększenia ekstrakcji tlenu są również ograniczone [9]. Poszukiwanie progu bezpiecznej rSO_2 spowodowało identyfikację wartości 50%. Pacjenci, u których desaturacja nie była niższa niż 50% w ciągu trwania całej procedury, nie wykazywali zaburzeń poznawczych w okresie pooperacyjnym [10]. Przegląd piśmiennictwa i zalecenia producenta wskazują na konieczność podjęcia czynności interwencyjnych w przypadku desaturacji na poziomie 20% w stosunku do linii bazowej lub bezwzględnej wartości określonej na 40%. Dostępne są

doniesienia, które nieco liberalniej traktują przedstawione wartości, wskazując na próg interwencji liczbę 25% w stosunku do linii bazowej [11]. Interpretować należy najniższe wartości oraz czas ich trwania (pole pod krzywą). Uśrednianie wartości w czasie może maskować epizody hipoksji [1]. Zaletą monitorowania NIRS jest dostarczanie informacji w czasie rzeczywistym i ocena reakcji OUN na podjęte czynności terapeutyczne [12].

Neurodegeneracja następuje dwustopniowo. Jako pierwsza pojawia się ostra martwica komórek. Apoptoza jest oddaloną w czasie reakcją, której konsekwencją jest także śmierć komórek. Ciężka, nawet krótkotrwała hipoksja ($rSO_2 < 30\%$) powoduje śmierć komórek w obu mechanizmach [1]. Monitorowanie rSO_2 i podjęta w krótkim czasie skuteczna interwencja w przypadkach istotnej desaturacji ma szanse zredukowania potencjalnego udaru do przejściowego deficytu neurologicznego (ang. *transient ischemic attack* – TIA). Śródoperacyjne rozpoznanie incydentu desaturacji obliguje do podjęcia czynności korygujących. Każde obniżenie ciśnienia systemowego o 10% po incydencie udarowym zwiększa dwukrotnie deficyt neurologiczny [13].

Najczęstszymi przyczynami desaturacji mózgowej są: hipertermia, hipotensja poniżej progu autoregulacji, niedokrwistość, desaturacja krwi tętniczej, niskie stałe tętnicze ciśnienie parcjalne dwutlenku węgla ($PaCO_2$), wazokonstrykcja naczyń mózgowych, mikroatorowość.

Mózgowy przepływ krwi w czasie krążenia pozaustrojowego i hipotermii jest regulowany ciśnieniem systemowym, przepływ pompy ma mniejsze znaczenie. W celu zachowania prawidłowej perfuzji mózgu należy utrzymywać założone wartości ciśnienia systemowego przy niskich i wysokich przepływach pompy do krążenia pozaustrojowego [14]. Zalecanymi wartościami średniego ciśnienia krwi jest 50–70 mm Hg u chorych bez schorzeń dodatkowych i 70–90 mm Hg u pacjentów z uogólnioną miażdżycą, po udarach i TIA oraz u chorych ze zwężeniem tętnic szyjnych.

Ciśnienie parcjalne dwutlenku węgla ma najsilniejszy wpływ na mózgowy przepływ krwi (ang. *cerebral blood flow* – CBF). Opór naczyń mózgowych jest kontrolowany przez pH płynu zewnątrzkomórkowego otaczającego tętniczki mózgowe. Wahanie $PaCO_2$ prawie natychmiast zmieniają CBF, ponieważ dyfunduje on bardzo szybko z naczyń, modyfikując pH płynu pozakomórkowego. Rozpuszczalność dwutlenku węgla we krwi zwiększa się w hipotermii, co powoduje obniżenie $PaCO_2$ i wzrost pH. Konsekwencją kliniczną jest przesunięcie krzywej dysocjacji hemoglobiny w lewo i obkurczenie naczyń. Skorygowana do temperatury metoda oznaczania gospodarki kwasowo-zasadowej nosi nazwę pH-stat, α -stat nie uwzględnia zmian temperatury. Użycie metody pH-stat generuje nadmierny przepływ krwi w mózgu, powoduje wzrost ciśnienia śródczaszkowego ze wszystkimi konsekwencjami. Zasadne jest jej stosowanie tylko u dzieci operowanych w głębokiej hipotermii. W pozostałych przypadkach rekomendowana jest metoda α -stat [15].

Ogrzewanie z hipotermii skutkuje zaburzeniami autoregulacji przepływu krwi w OUN. Utrata autoregulacji powoduje niedokrwienie przy niskich ciśnieniach systemowych

krwi i nadmierny przepływ przy wysokich ciśnieniach krwi. Zależny od ciśnienia przepływ mózgowy w czasie ogrzewania (upośledzona autoregulacja) może spowodować hipoperfuzję, szczególnie u chorych z miażdżycą naczyń mózgowych. Powodem jest charakterystyczne dla fazy ogrzewania niskie ciśnienie systemowe. Proces uzyskiwania prawidłowej temperatury po okresie hipotermii powinien być powolny. Tempo ogrzewania nie powinno przekraczać $1^\circ C/5$ min. Temperatura krwi mierzona w linii aortalnej nie powinna przekraczać $37^\circ C$. Gwałtowny wzrost temperatury niweczy neuroprotektoryjne działanie hipotermii. Konsekwencją szybkiego wygrzewania jest stres oksydacyjny i dysfunkcja śródbłonna [16].

Powszechnie wiadomo, że liberalne podejście do przetaczania krwi w okresie okołoperacyjnym zwiększa śmiertelność. Monitorowanie (rSO_2) OUN spowodowało wzrost zużycia krwi, redukując jednocześnie liczbę powikłań neurologicznych [10]. Na podobną prawidłowość zwrócono także uwagę w przypadku operacji kardiochirurgicznych u chorych obciążonych niewydolnością nerek. Hematokryt 20% jest zdecydowanie niebezpieczną wartością – nawet w czasie krążenia pozaustrojowego. Część autorów uważa, że ograniczenie powikłań w metodzie *off-pump* wynika z możliwości uniknięcia zjawiska hemodylucji [10]. Ten tok myślenia skłania do minimalizacji objętości układów do krążenia pozaustrojowego.

Tonus naczyń mózgowych zależy od stosowanych leków. Leki o bezpośrednim działaniu obkurczającym naczynia mogą wpływać na opór naczyń mózgowych i ograniczać przepływ. Preferowanym środkiem obkurczającym naczynia stosowanym w czasie krążenia pozaustrojowego jest noradrenalina. Krążenie pozaustrojowe indukuje uwalnianie komplementu i endotoksyn, aktywuje uogólnioną reakcję zapalną, co powoduje dysfunkcję śródbłonna i ograniczenie syntezy endogennego tlenu azotu (NO). Komórki śródbłonna utrzymują swoją reaktywność w stosunku do egzogennego NO. Podana dożylnie nitrogliceryna (donator NO) powoduje rozszerzenie naczyń i stanowi profilaktykę uszkodzenia niedokrwienno-reperfuzyjnego. Dożylna infuzja nitrogliceryny przed zastosowaniem krążenia pozaustrojowego i w jego trakcie pomaga utrzymać rSO_2 na prawidłowym poziomie u pacjentów z grupy dużego ryzyka [17].

W populacji pacjentów operowanych z powodu schorzeń serca, u których monitorowano rSO_2 obserwowano korelację pomiędzy wartością rSO_2 a funkcją serca. Być może NIRS będzie w przyszłości wykorzystywany jako nieinwazyjne narzędzie oceny funkcji serca [9]. Autorzy pracy wskazali na zależność pomiędzy wartością linii bazowej u pacjentów przed indukcją znieczulenia a funkcją serca. Uznali oni, że jest to wskaźnik oceniający czynność serca o wyższej czułości i swoistości niż parametry uzyskiwane z użyciem cewnika Swan-Ganza. Pacjenci z niewydolnością układu krążenia charakteryzują się niższą wartością rSO_2 .

Zasadne jest używanie monitorowania OUN w przypadkach operacji dotyczących łuku aorty, kiedy wymagane jest zaklepowanie naczyń od niego odchodzących i dodatkowa perfuzja mózgu. Pomiar rSO_2 umożliwi rozpoznanie nie-

prawidłowego położenia kaniuli dostarczającej zastępcze ukrwienie OUN. Nieprawidłowe usytuowanie kaniuli nie jest widoczne z pola operacyjnego i może być rozpoznane tylko pośrednio [11].

Przegląd piśmiennictwa dowodzi celowości monitorowania rSO_2 w czasie zabiegów kardiochirurgicznych. Podawane korzyści dotyczą poprawy jakości znieczulenia, ograniczenia zaburzeń poznawczych. Prowadzenie dalszych prospektywnych badań może jednoznacznie odpowiedzieć na pytanie, w jakim zakresie można ograniczyć powikłania, stosując NIRS [18].

Sekcja Kardio- i Torakoanestezji zorganizowała kurs na temat monitorowania rSO_2 . Poniżej przedstawiono praktyczne zasady korzystania z tego narzędzia w okresie śródoperacyjnym.

SCHEMAT MONITOROWANIA OUN (rSO_2)

Wyznaczenie linii bazowej

Po odtłuszczeniu skóry głowy, przed indukcją znieczulenia umieścić elektrody w miejscach zalecanych przez producenta. Wartość linii bazowej wyznaczyć w ok. 3 min po założeniu elektrod (warunek – wartość utrzymuje się na tym samym poziomie przez ok. 1 min). Nie stosować w tym czasie tlenoterapii.

Interwencyjne wartości oksymetrii mózgowej (rSO_2):

- obniżenie $rSO_2 \geq 20\%$ w stosunku do linii bazowej;
- bezwzględna wartość $rSO_2 \leq 50\%$;
- u pacjentów z wartością bazową $rSO_2 < 50\%$ obniżenie $\geq 15\%$.

Wskazania do interwencji

Utrzymywanie się wartości uznanych za interwencyjne przez 1 min obliguje do podjęcia czynności korygujących w ciągu kolejnych 15 s.

Czynności korygujące:

- wykluczenie artefaktów;
- podwyższenie ciśnienia tętniczego (lewonor);
- zwiększenie rzutu (zwiększone wypełnienie; farmakoterapia);
- normokapnia ($PaCO_2$ 40 mm Hg; należy postąpić się gazometrią niekorygowaną do temperatury – pH-stat);
- uniesienie wezłowania, zmiana ułożenia głowy (poprawa sływu żylnego); ewentualna repozycja kaniul (perfuzja OUN w operacjach tętniaków łuku aorty);
- pogłębienie znieczulenia (zmniejszone zapotrzebowanie OUN na O_2) – wlew propofolu (możliwość dołączenia tiopentalu w dawce 1 mg/kg m.c./godz. – tzw. *on the top*);
- wlew nitrogliceryny;
- zwiększona ułamkowa zawartość wdychanego tlenu (FiO_2);
- skorygowanie niedokrwistości (wg obowiązujących standardów);
- utrzymanie homeostazy (pH 7,25–7,45; diureza 1 ml/kg m.c./godz.; glikemia 4–8 mmol/l; ogrzewa-

nie z kontrolą temperatury na linii aortalnej $< 37,0^\circ C$; wzrost temperatury o $1^\circ C/5$ min);

- miejscowe ochładzanie głowy (zmniejszone zapotrzebowanie OUN na O_2);
- przepływ pulsacyjny.

W zabrzańskim Śląskim Centrum Chorób Serca ten rodzaj monitorowania zawarty jest w standardzie postępowania od 2 lat u chorych w wieku powyżej 75 lat oraz u pacjentów ze zwężeniem tętnic szyjnych, z przebyłym udarem OUN, w operacjach tętniaków, przeszczepu serca i u wszystkich chorych z dużym ryzykiem operacyjnym. Od momentu wprowadzenia przedstawionych zasad postępowania zredukowano częstość występowania zespołów majaczeniowych o połowę. Wydaje się, że zmniejszyła się również liczba poważnych powikłań neurologicznych, czego jednak nie udało się potwierdzić w analizie statystycznej.

Piśmiennictwo

1. Yao FS, Tseng CC, Ho CY, Levin SK, Illner P. Cerebral oxygen desaturation is associated with early postoperative neuropsychological dysfunction in patients undergoing cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2004; 18: 552-558.
2. Likosky DS, Leavitt BJ, Marrin CA, Malenka DJ, Reeves AG, Weintraub RM, Caplan LR, Baribeau YR, Charlesworth DC, Ross CS, Braxton JH, Hernandez F Jr, O'Connor GT; Northern New England Cardiovascular Disease Study Group. Intra- and postoperative predictors of stroke after coronary artery bypass grafting. *Ann Thorac Surg* 2003; 76: 428-435.
3. Murkin JM, Adams SJ, Novick RJ, Quantz M, Bainbridge D, Iglesias I, Cleland A, Schaefer B, Irwin B, Fox S. Monitoring brain oxygen saturation during coronary bypass surgery: a randomized, prospective study. *Anesth Analg* 2007; 104: 51-58.
4. Hong SW, Shim JK, Choi YS, Kim DH, Chang BC, Kwak YL. Prediction of cognitive dysfunction and patients' outcome following valvular heart surgery and the role of cerebral oximetry. *Eur J Cardiothorac Surg* 2008; 33: 560-565.
5. Taillefer MC, Denault AY. Cerebral near-infrared spectroscopy in adult heart surgery: systematic review of its clinical efficacy. *Can J Anaesth* 2005; 52: 79-87.
6. Edmonds HL Jr. Multi-modality neurophysiologic monitoring for cardiac surgery. *Heart Surg Forum* 2002; 5: 225-228.
7. Ferrari M, Giannini I, Sideri G, Zanette E. Continuous non invasive monitoring of human brain by near infrared spectroscopy. *Adv Exp Med Biol* 1985; 191: 873-882.
8. Casati A, Spreafico E, Putzu M, Fanelli G. New technology for noninvasive brain monitoring: continuous cerebral oximetry. *Minerva Anestesiol* 2006; 72: 605-625.
9. Paquet C, Deschamps A, Denault AY, Couture P, Carrier M, Babin D, Levesque S, Piquette D, Lambert J, Tardif JC. Baseline regional cerebral oxygen saturation correlates with left ventricular systolic and diastolic function. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2008; 22: 840-846.
10. Slater JP, Guarino T, Stack J, Vinod K, Bustami RT, Brown JM 3rd, Rodriguez AL, Magovern CJ, Zaubler T, Freundlich K, Parr GV. Cerebral oxygen desaturation predicts cognitive decline and longer hospital stay after cardiac surgery. *Ann Thorac Surg* 2009; 87: 36-45.
11. Rubio A, Hakami L, Münch F, Tandler R, Harig F, Weyand M. Noninvasive control of adequate cerebral oxygenation during low-flow antegrade selective cerebral perfusion on adults and infants in the aortic arch surgery. *J Card Surg* 2008; 23: 474-479.
12. Hongo K, Kobayashi S, Okudera H, Hokama M, Nakagawa F. Noninvasive cerebral optical spectroscopy: depth-resolved measurements of cerebral haemodynamics using indocyanine green. *Neurol Res* 1995; 17: 89-93.
13. Goldman S, Sutter F, Ferdinand F, Trace C. Optimizing intraoperative cerebral oxygen delivery using noninvasive cerebral oximetry decreases the incidence of stroke for cardiac surgical patients. *Heart Surg Forum* 2004; 7: E376-E381.
14. Schwartz AE, Sandhu AA, Kaplon RJ, Young WL, Jonassen AE, Adams DC, Edwards NM, Sistino JJ, Kwiatkowski P, Michler RE. Cerebral blood flow is

determined by arterial pressure and not cardiopulmonary bypass flow rate. *Ann Thorac Surg* 1995; 60: 165-170.

15. Abdul Aziz KA, Meduoye A. Is pH-stat or alpha-stat the best technique to follow in patients undergoing deep hypothermic circulatory arrest? *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2010; 10: 271-282.
16. Joshi B, Brady K, Lee J, Easley B, Panigrahi R, Smielewski P, Czosnyka M, Hogue CW Jr. Impaired autoregulation of cerebral blood flow during re-warming from hypothermic cardiopulmonary bypass and its potential association with stroke. *Anesth Analg* 2010; 110: 321-328.
17. Piquette D, Deschamps A, Bélisle S, Pellerin M, Levesque S, Tardif JC, Denault AY. Effect of intravenous nitroglycerin on cerebral saturation in high-risk cardiac surgery. *Can J Anaesth* 2007; 54: 718-727.
18. Vohra HA, Modi A, Ohri SK. Does use of intra-operative cerebral regional oxygen saturation monitoring during cardiac surgery lead to improved clinical outcomes? *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2009; 9: 318-322.