

Zastosowanie oksymetrii tkankowej w anestezjologii i intensywnej terapii

Tissue oximetry in anaesthesia and intensive care

Aleksandra Biedrzycka¹, Romuald Lango²

¹Klinika Anestezjologii i Intensywnej Terapii, Uniwersyteckie Centrum Kliniczne w Gdańsku

²Zakład Kardiointensywnej Terapii, Gdański Uniwersytet Medyczny

Abstract

Conventional monitoring during surgery and intensive care is not sufficiently sensitive to detect acute changes in vital organs perfusion, while its good quality is critical for maintaining their function. Disturbed vital organ perfusion may lead to the development of postoperative complications, including neurological sequel and renal failure. Near-infrared spectroscopy (NIRS) represents one of up-to-date techniques of patient monitoring which is commonly used for the assessment of brain oximetry in thoracic aorta surgery, and – increasingly more often – in open-heart surgery. Algorithms for maintaining adequate brain saturation may result in a decrease of neurological complications and cognitive dysfunction following cardiac surgery. The assessment of kidney and visceral perfusion with tissue oximetry is gaining increasing interest during pediatric cardiac surgery. Attempts at decreasing complications by the use of brain oximetry during carotid endarterectomy, as well as thoracic and abdominal surgery demonstrated conflicting results. In recent years NIRS technique was proposed as a tool for muscle perfusion assessment under short term ischemia and reperfusion, referred to as vascular occlusion test (VOT). This monitoring extension allows for the identification of early disturbances in tissue perfusion. Results of recent studies utilizing VOT suggest that the muscle saturation decrease rate is reduced in septic shock patients, while decreased speed of saturation recovery on reperfusion is related to disturbed microcirculation. Being non-invasive and feasible technique, NIRS offers an improvement of preoperative risk assessment in cardiac surgery and promises more comprehensive intraoperative and ICU patient monitoring allowing for better outcome.

Key words: tissue oximetry, brain saturation, stroke

Słowa kluczowe: oksymetria tkankowa, saturacja mózgowia

Anestezjologia Intensywna Terapia 2016, tom XLVIII, nr 1, 42–50

Przeprowadzanie operacji u coraz starszych chorych, obciążonych licznymi chorobami współistniejącymi, często będących w ciężkim stanie ogólnym, a także konieczność ich leczenia na oddziałach intensywnej terapii (OIT), sprawiają, że coraz większe znaczenie ma wczesne rozpoznawanie i przewidywanie zaburzeń, które w konsekwencji mogą doprowadzić do pogorszenia stanu chorego i zgonu. Po-

znanie powiązań zaburzeń perfuzji narządów, takich jak mózg, nerki i przewód pokarmowy, z ich następstwami, do których należą zaburzenia neuropoznawcze, ostre uszkodzenie nerek i zespół dysfunkcji wielonarządowej, wskazuje na potrzebę poszukiwania technik monitorowania, umożliwiających wczesną identyfikację zagrożeń i podjęcie interwencji terapeutycznych. Do najważniejszych celów optymalizacji

Należy cytować angielską wersję: *Biedrzycka A, Lango R: Tissue oximetry in anaesthesia and intensive care. Anaesthesiol Intensive Ther 2016; 48: 41–48. doi: 10.5603/AIT.2016.0005.*

funkcji układu krążenia w okresie okołoperacyjnym należy utrzymanie odpowiedniego przepływu krwi w ważnych dla życia narządach: mózgu, sercu, nerkach, wątrobie i ścianie przewodu pokarmowego. Ze względów praktycznych najczęściej monitorowanym parametrem hemodynamicznym jest ciśnienie tętnicze. Dla zachowania funkcji i struktury narządów istotniejsze znaczenie mogą mieć jednak rzut minutowy serca i odpowiednia dystrybucja przepływu krwi przez poszczególne narządy. Stosowane wspólnie rutynowo techniki monitorowania hemodynamiki na sali operacyjnej i OIT nie umożliwiają oceny mikrokrążenia i dystrybucji przepływu krwi do narządów. Nie pozwalają także na wykrycie wczesnej fazy zaburzeń funkcji układu krążenia, kiedy aktywacja mechanizmów kompensacyjnych pozwala na utrzymanie prawidłowego ciśnienia tętniczego.

W piśmiennictwie ostatnich lat wiele uwagi poświęca się spektroskopii w bliskiej podczerwieni (*NIRS, near infra-red spectroscopy*), która polega na pomiarze wysycenia hemoglobiny tlenem we krwi przepływającej przez określony narząd. Wyniki badań wskazują, że ta dynamicznie rozwijająca się technika monitorowania, stosowana przede wszystkim podczas operacji serca i aorty piersiowej do oceny saturacji mózgowej, już dziś może stanowić istotny krok w kierunku poprawy jakości oceny stanu chorego w okresie okołoperacyjnym.

PODSTAWY FIZYCZNE I BIOLOGICZNE SPEKTROSKOPII W BLISKIEJ PODCZERWIENI

Metoda spektroskopii w bliskiej podczerwieni, opisana po raz pierwszy prawie 40 lat temu [1], opiera się na pomiarze natężenia wiązki promieniowania o długości fali w przedziale 730–910 nm, w zależności od typu urządzenia monitorującego. Emitowane przez diodę lub laser promieniowanie podlega zjawiskom odbicia, zmiany kierunku, rozproszenia i absorpcji. Zależność pochłaniania promieniowania przechodzącego przez tkankę od stężenia poszukiwanej substancji opisana jest prawem Lamberta-Beera. Absorpcja części fotonów emitowanego promieniowania przez chromofory, głównie oksyhemoglobinę i deoksyhemoglobinę, ale także mioglobinę i oksydazę cytochromu C, umożliwia ocenę ich stężeń [2]. Stopień oksigenacji chromoforów wpływa na absorpcję przenikającego przez tkankę światła, co pozwala na ocenę jej utlenowania. W odróżnieniu od pulsoksymetrii, technika NIRS nie pozwala na odróżnienie krwi tętniczej od żyłnej. Wartość otrzymanego pomiaru dotyczy więc krwi mieszanej. Podstawowym zastosowaniem klinicznym spektroskopii w bliskiej podczerwieni, poza pulsoksymetrią, jest pomiar saturacji mózgowej. Ponieważ za absorpcję promieniowania w korze mózgu odpowiada w około 70% krew żylna, w 25% krew tętnicza, a w 5% krew włosnaczkowa, zmniejszenie saturacji mózgowej odnosi się

przede wszystkim do krwi żyłnej, co najczęściej wynika z miejscowego zwiększenia ekstrakcji tlenu [3].

Czujnik używany do pomiaru saturacji tkankowej, w piśmiennictwie określany także jako optoda, składa się ze źródła światła i dwóch detektorów. W zależności od rodzaju urządzenia, źródłem światła jest dioda LED (INVOS i Equanox) lub laser (Fore-Sight, NIRO-300 i CerOx), emitujące promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie bliskiej podczerwieni. Droga fotonu pomiędzy źródłem światła i detektorem ma kształt eliptyczny i sięga głębokości równej około 1/3 odległości pomiędzy nimi. W celu wyeliminowania zakłóceń wynikających z pochłaniania promieniowania w penetrowanych strukturach pomiędzy badaną tkanką i czujnikiem, wykorzystuje się dwa detektory umieszczone w niewielkiej odległości od siebie [4]. Odbiornik bliższy rejestruje pomiar z płytszych warstw tj. skóry, czepca ścięgienistego, czaszki i opon mózgowych. Zmierzona wartość odejmowana jest od wyniku pomiaru odbiornika dalszego, co pozwala oszacować saturację krwi w mózgu. Ocenia się, że około 85% wiązki fotonów przenika przez korę mózgu, a 15% przez struktury położone bardziej powierzchownie [5]. Producenci urządzeń stosują różne odległości pomiędzy źródłem światła i odbiornikami, wynoszące 30 i 40 mm w monitorze INVOS oraz 15 i 50 mm w urządzeniu Fore-Sight. W przypadku monitora INVOS pozwala to na głębokość penetracji około 1,7 cm.

Umieszczenie czujników, po jednym z każdej strony, na wysokości 2–3 cm powyżej brzegu oczodołu, pozwala na monitorowanie oksigenacji kory mózgowej zaopatrywanej przez tętnicę przednią i środkową mózgu. Dla właściwej interpretacji wskazań monitora oksymetrii mózgowej, szczególnie w przypadku aparatów działających z wykorzystaniem diody LED, ważne jest ustalenie wartości początkowej, czyli saturacji mózgowej przed indukcją znieczulenia u chorego oddychającego powietrzem atmosferycznym. Do tej wartości odnosi się pomiary dokonywane w trakcie zabiegu. Stwierdzono, że śródoperacyjne zmniejszenie saturacji mózgowej o więcej niż 20% [1] lub 25% [6] wartości wyjściowej [2], a także zmniejszenie bezwzględnej wartości saturacji poniżej 50%, są związane z pooperacyjnymi zaburzeniami funkcji poznawczych [2, 7] oraz z większym ryzykiem udaru lub śpiączki [8].

Monitorowanie saturacji mózgowej z wykorzystaniem technologii NIRS ma wiele zalet, do których należą: nieinwazyjność, prosta interpretacja wyników oraz ich przedstawianie w czasie rzeczywistym, co pozwala na wczesne podjęcie interwencji i zwiększenie bezpieczeństwa znieczulenia. Na dokładność pomiaru nie ma wpływu wybór anestetyku i stosowanie elektrokoagulacji. Pomiar saturacji tkankowej jest czułą metodą monitorowania jakości ochrony mózgu podczas całkowitego zatrzymania krążenia w głębokiej hi-

potermii, gdy inne metody, w tym analiza sygnału EEG, są trudne do interpretacji.

OGRANICZENIA WYKORZYSTANIA NIRS DO OCENY SATURACJI MÓZGOWEJ

Jak każda technika monitorowania, oksymetria mózgowia nie jest pozbawiona słabych stron. Do czynników potencjalnie zaburzających wskazania NIRS należy zawartość pigmentu w skórze oraz duże stężenie bilirubiny sprzężonej. Detekcję sygnału mogą również zakłócać silne zewnętrzne źródło światła obecne na sali operacyjnej czy niedokładność przylegania elektrod ze względu na przykład na wzmożoną potliwość pacjenta. Nie bez wpływu pozostaje także ewentualna obecność krwiaka nad- lub podtwardówkowego, który może sprawić, że kora mózgu znajdzie się poza zasięgiem promieniowania emitowanego przez czujnik. Obrzęk mózgu oraz lokalne zaburzenia perfuzji wynikające z obecności zmian miażdżycowych lub zatorów w tętnicach, należą do kolejnych czynników ograniczających wartość pomiaru saturacji mózgowej [9]. Zanik kory mózgu, często obserwowany u chorych w podeszłym wieku, może sprawić, że zasięg wiązki fotonów nie będzie wystarczający, by umożliwić ocenę jej oksygenacji (ryc. 2) [9]. Zauważono, że u osób w starszym wieku wskazania monitora NIRS mogą paradoksalnie obniżyć się podczas chłodzenia, a wzrastać podczas ogrzewania chorego (*brain cooling reactivity*), co wskazuje na obecność istotnych zaników korowych i ogranicza możliwość interpretacji oksymetrii mózgowej [5]. Kolejnym czynnikiem zaburzającym rejestrację oksymetrii może być stosowanie leków obkurczających naczynia [10]. Zaobserwowano, że obkurczenie naczyń skórnych pod wpływem noradrenaliny wywiera silniejszy wpływ na wskazania oksymetru mózgowego niż zmniejszenie rzutu serca i zmiany prężności dwutlenku węgla we krwi [9]. Grocott i wsp. [11] wykazali, że zmiany oksygenacji krwi w skórze głowy mogą być odpowiedzialne za 17% zmian saturacji rejestrowanych metodą NIRS. Monitor może nie wykazywać zmian wartości saturacji tkankowej w przypadku, gdy transport tlenu do kory mózgowej i jego zużycie zmieniają się w jednakowym stopniu. Przyczyną utrudnień w ocenie skuteczności interwencji, mających na celu przywrócenie prawidłowej saturacji mózgowej, są różnice mierzonych wartości pomiędzy poszczególnymi typami urządzeń pomiarowych. O ile jednak pomiar bezwzględnych wartości saturacji mózgowej podlega opisanym powyżej ograniczeniom, o tyle trendy saturacji mózgowej pozwalają prawidłowo interpretować wpływ rozmaitych czynników na utlenowanie mózgu [12].

ZASTOSOWANIE OKSYMETRII MÓZGOWEJ PODCZAS OPERACJI KARDIOCHIRURGICZNYCH

Ze względu na to, że największe ryzyko występowania czynników zaburzających transport tlenu do mózgu

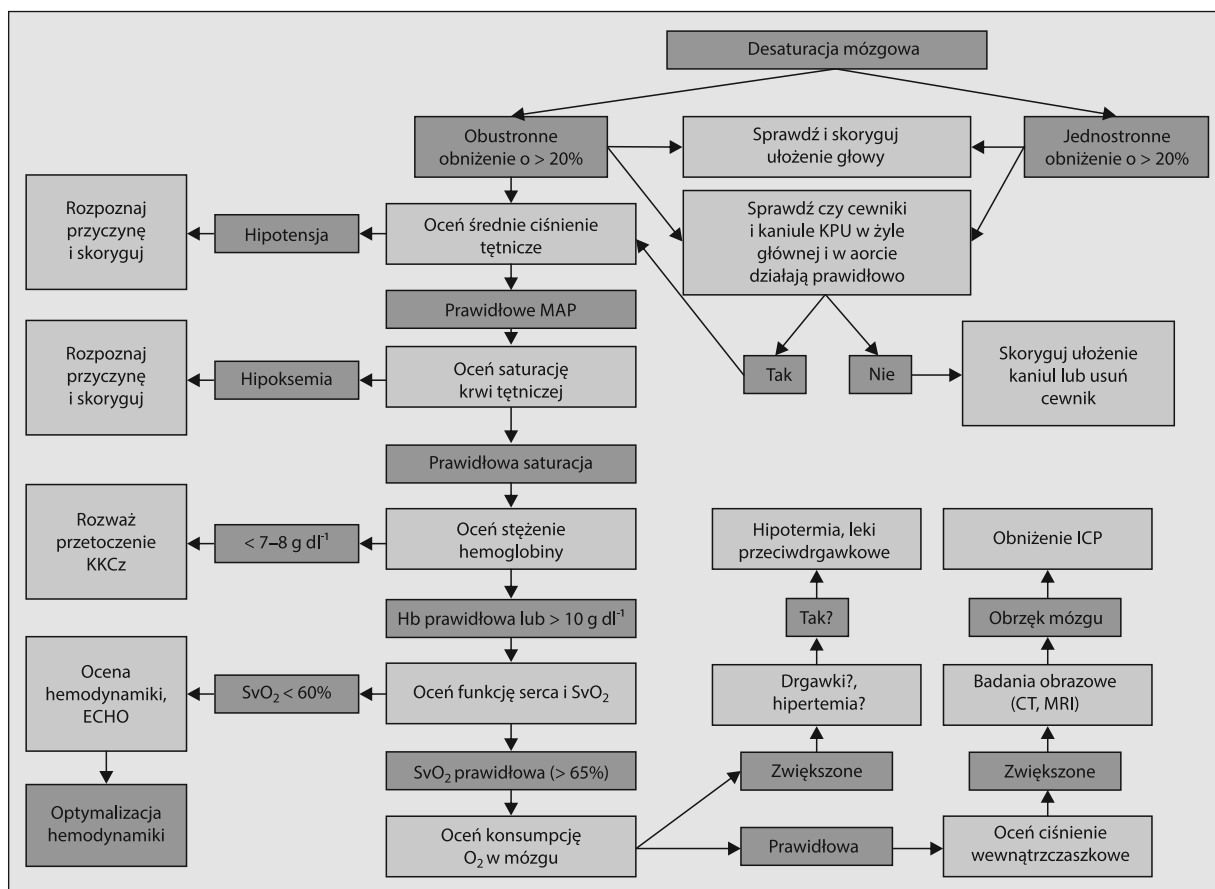
jest związane ze stosowaniem krążenia pozaustrojowego, monitorowanie saturacji mózgowej najczęściej stosuje się podczas operacji kardiochirurgicznych. Niewystarczający transport tlenu w stosunku do zapotrzebowania mózgu może być spowodowany zarówno zmniejszeniem ciśnienia tętniczego lub hemodilucją, jak i zwiększeniem zużycia tlenu podczas ogrzewania chorego przed zakończeniem krążenia pozaustrojowego. Do innych czynników, mogących powodować obniżenie saturacji mózgowej, należą: zmniejszenie utlenowania krwi tętniczej, hipokapnia i wynikające z niej obkurczenie tętnic mózgowych, zaburzenie spływu przez kaniulę żylną krążenia pozaustrojowego, a także mikro- i makrozatory, oraz niepulsacyjny charakter przepływu krwi [13, 14]. Występowanie wymienionych czynników powoduje, że ryzyko powikłań neurologicznych po operacjach kardiochirurgicznych jest większe w porównaniu z innymi dziedzinami chirurgii [10].

Monitorowanie saturacji mózgowej i podejmowanie interwencji mających doprowadzić do przywrócenia jej prawidłowych wartości może poprawić wyniki leczenia, szczególnie w zakresie występowania powikłań neurologicznych i pooperacyjnych zaburzeń funkcji poznawczych [10]. Podczas operacji rozwarstwienia aorty piersiowej monitorowanie oksymetrii mózgowej często wskazuje na potrzebę zmiany sposobu kaniulacji do selektywnej perfuzji mózgowej. Liczne opisy przypadków wskazują, że w trakcie tego rodzaju operacji monitorowanie saturacji mózgowej pozwala rozpoznać niedotlenienie mózgu, na które nie wskazują żadne inne rutynowo monitorowane parametry [10].

Zmniejszenie saturacji mózgowej poniżej opisanych wcześniej wartości granicznych podczas operacji serca lub aorty piersiowej wskazuje, że transport tlenu do mózgu jest niewystarczający dla zaspokojenia jego potrzeb metabolicznych. Algorytm postępowania w przypadku obniżenia saturacji mózgowej przedstawiono na rycinie 1. Zastosowanie tego schematu postępowania okazało się skuteczne w 88% przypadków zmniejszenia saturacji, jego poszczególne elementy wykazywały jednak różną efektywność — od braku jakiegokolwiek wpływu zmiany ułożenia głowy, aż do 100% skuteczności w odpowiedzi na skorygowanie położenia kaniuli żyłnej krążenia pozaustrojowego, a także po przetoczeniu koncentratu krwinek czerwonych [15].

Chorzy, u których podczas operacji kardiochirurgicznych występują epizody zmniejszenia saturacji mózgowej, są bardziej narażeni na powikłania, takie jak: niewydolność oddechowa, zawał serca, reoperacja i pooperacyjne zaburzenia funkcji poznawczych [7].

Wykorzystanie saturacji mózgowej jako parametru wyjściowego dla podjęcia decyzji o interwencji w celu zwiększenia transportu tlenu, może nie tylko korzystnie wpływać na stan ośrodkowego układu nerwowego, ale także funkcję innych narządów. Stwierdzono, że postępowanie ukierunko-



Rycina 1. Algorytm postępowania w przypadku obniżenia saturacji mózgowej podczas operacji kardiologicznej [12]

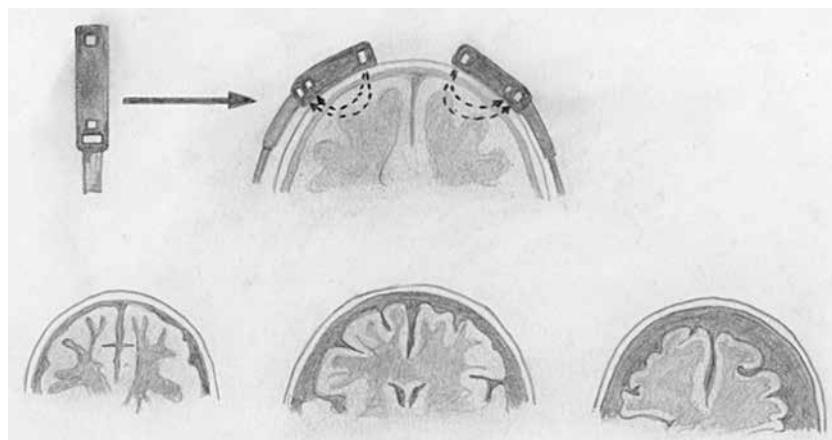
wane na utrzymanie prawidłowej saturacji mózgowej podczas operacji serca powoduje zmniejszenie ryzyka udaru, zaobserwowano natomiast, że jest ono związane z mniejszą częstością występowania niewydolności narządowej. Śródoperacyjne zmniejszenie saturacji mózgowej może także korelować z przedłużonym czasem leczenia w oddziale intensywnej terapii oraz zwiększoną śmiertelnością [16].

Na podstawie badania chorych poddanych operacji pomostowania tętnic wieńcowych bez krążenia pozaustrojowego (OPCABG, *off-pump coronary artery bypass grafting*) stwierdzono, że zmniejszenie wartości saturacji mózgowej poprzedza zmniejszenie saturacji mieszanej krwi żyłnej [17]. Dlatego wysunięto tezę, że wczesne rozpoczęcie postępowania w celu przywrócenia prawidłowej oksigenacji mózgu może przyczynić się także do szybkiej poprawy bilansu tlenowego ustroju.

Obecnie uważa się że saturacja mózgowa mierzona bezpośrednio przed operacją kardiologiczną ma znaczenie rokownicze. Zaobserwowano, że jej mała wartość koreluje z dużym ryzykiem operacji w skali EuroSCORE oraz słabą funkcją skurczową i rozkurczową lewej komory, oraz wskazuje na zwiększone ryzyko pooperacyjnego majaczenia [17, 18]. Heringlake i wsp. [19] wykazali, że najmniejsza wartość

saturacji mózgowej bezpośrednio przed operacją kardiologiczną, wynosząca poniżej 50%, wiąże się z większą śmiertelnością 30-dniową i roczną.

Dotychczasowe badania, wskazujące na korzyści z monitorowania saturacji mózgowej podczas operacji serca — obejmują przeważnie małe grupy chorych i są niejednorodne zarówno pod względem metodyki, jak i stosowanych aparatów, co utrudnia porównanie wyników badań [20]. Systematyczny przegląd 43 publikacji, obejmujących obserwacje ponad 50 tysięcy dorosłych pacjentów kardiologicznych, nie potwierdził jednoznacznie korzyści wynikających z podejmowania interwencji na podstawie wskazania NIRS, co wskazuje na potrzebę dalszych badań [20]. Poszukując doskonalszego parametru powiązanego z ryzykiem powikłań neurologicznych zaproponowano określenie stopnia i czasu utrzymywania się obniżonej saturacji mózgowej jako tak zwanego ładunku desaturacji [15]. Wynik randomizowanego badania klinicznego wykazał skuteczność interwencji podejmowanych według ustalonego protokołu, mających na celu zmniejszenie ładunku desaturacji, według autorów badania potwierdzenie związku zmniejszenia ładunku desaturacji z poprawą wyników leczenia wymaga jednak dalszych badań [15].



Rycina 2. Schematyczne przedstawienie zasięgu wiązki promieniowania podczas pomiaru saturacji mózgowej. Dolne rysunki przedstawiają stosunki anatomiczne u dziecka, osoby dorosłej i osoby w podeszłym wieku z zanikiem kory mózgu, u której zasięg wiązki promieniowania może być niewystarczający do pomiaru saturacji mózgowej (rys. dr. n. med. Pawła Żelechowskiego)

W Polsce pionierskie prace nad monitorowaniem saturacji mózgowej pochodzą ze Śląskiego Centrum Chorób Serca w Zabrzu. Kucewicz i wsp. [21] zaproponowali klarowny algorytm postępowania w przypadku zmniejszenia wartości saturacji mózgowej o $> 20\%$ w stosunku do linii bazowej, lub $< 50\%$ wartości bezwzględnej, uwzględniający między innymi zwiększenie ciśnienia tętniczego za pomocą nora-drenaliny, zwiększenie rzutu serca, poprawę spływu żylnego, ewentualną repozycję kaniul, pogłębienie znieczulenia w celu zmniejszenia zapotrzebowania mózgowia na tlen, zwiększenie zawartości tlenu w mieszaninie oddechowej, oraz skorygowanie wentylacji w celu utrzymania prawidłowej prężności dwutlenku węgla, a także ewentualne dołączenie wlewu nitrogliceryny.

ZASTOSOWANIE OKSYMETRII MÓZGOWEJ W INNYCH DZIEDZINACH CHIRURGII

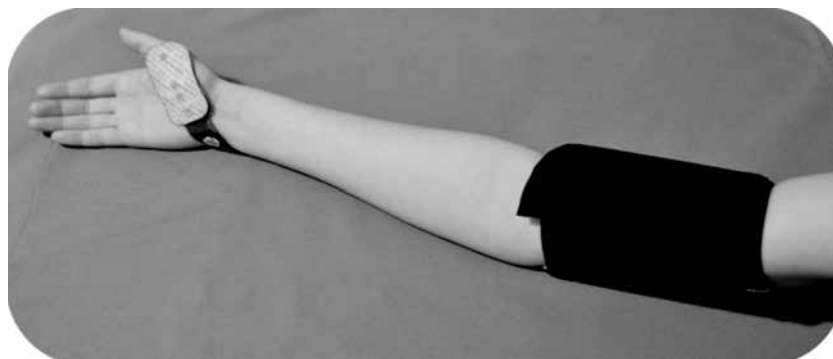
Endarterektomia tętnic szyjnych wiąże się z dużym ryzykiem udaru mózgu. Postulowano, że monitorowanie saturacji mózgowej podczas tego typu operacji mogłoby zmniejszyć ryzyko krytycznego niedokrwienia mózgu po stronie operowanej tętnicy [22–24]. Chociaż przezczaszkowe badanie dopplerowskie (TCD, *trans-cranial Doppler*), polegające na monitorowaniu zmniejszenia prędkości przepływu krwi w tętnicy środkowej mózgu przez skroniowe okienko akustyczne, może bardziej precyzyjnie identyfikować chorych z ryzykiem niedokrwienia [25], jego zastosowanie na sali operacyjnej jest technicznie trudne i kłopotliwe, a u około 20% osób niemożliwe do wykonania [22]. Dla wykrywania istotnego zmniejszenia przepływu mózgowego pomiar saturacji mózgowej wykazuje czułość porównywalną z TCD, ponieważ jest jednak mało specyficzny, może być źródłem wyników fałszywie dodatnich. Dlatego podejmowanie decyzji o zakładaniu tymczasowych zespolzeń omijających (tzw. *shuntów*) na podstawie pomiaru saturacji mózgowej prowadziłyby

do korzystania z nich także u wielu chorych, u których nie są niezbędne [25]. Niemniej, Mille i wsp. [26] stwierdzili, że jeżeli saturacja mózgowa nie zmniejsza się o więcej niż 20% w ciągu pierwszych 2 min po założeniu zacisku na tętnicę szyjną, to udar niedokrwienno jest mało prawdopodobny i *shunt* nie powinien być potrzebny. Wynik innego badania wykazuje, że obniżenie o nawet 13% saturacji mózgowej mierzonej urządzeniem NIRO-300 (Hamamatsu Photonics, Japonia) jest w 97% zgodne z występowaniem w badaniu EEG zmian charakterystycznych dla niedokrwienia mózgu [27].

Badania nad wykorzystaniem pomiaru saturacji mózgowej w celu poprawy wyników leczenia prowadzono także podczas operacji torakochirurgicznych z wentylacją jednego płuca [28] i u chorych w wieku podeszłym poddawanych rozległym operacjom brzuszным [6]. Tang i wsp. [29] zaobserwowali związek pomiędzy małą wartością saturacji mózgowej i występowaniem zaburzeń funkcji poznawczych we wczesnym okresie po operacji w czasie której stosowano wentylację jednego płuca. Stwierdzono także, że chorzy, u których obserwowano zmniejszenie saturacji mózgowej o co najmniej 25% znamiennie dłużej pozostawali po operacji w szpitalu [30]. Nawet krótkotrwałe epizody zmniejszenia saturacji mózgowej poniżej 65%, które obserwowano u ponad połowy chorych, były związane z dwukrotnie częstszym występowaniem pooperacyjnych zaburzeń świadomości. Stwierdzono także, że chorzy w podeszłym wieku, u których możliwe było przywrócenie zmniejszonej saturacji mózgowej do wartości prawidłowych, rzadziej wykazywali zaburzenia funkcji poznawczych i wymagali krótszego leczenia w oddziale intensywnej terapii [30].

PRÓBY WYKORZYSTANIA OKSYMETRII DO OCENY UTLENOWANIA INNYCH NARZĄDÓW

Poszukiwania klinicznych zastosowań monitorowania saturacji tkankowej za pomocą techniki NIRS nie ograniczają



Rycina 3. Przygotowanie do wykonania testu okluzji przepływu (VOT) na kończynie górnej

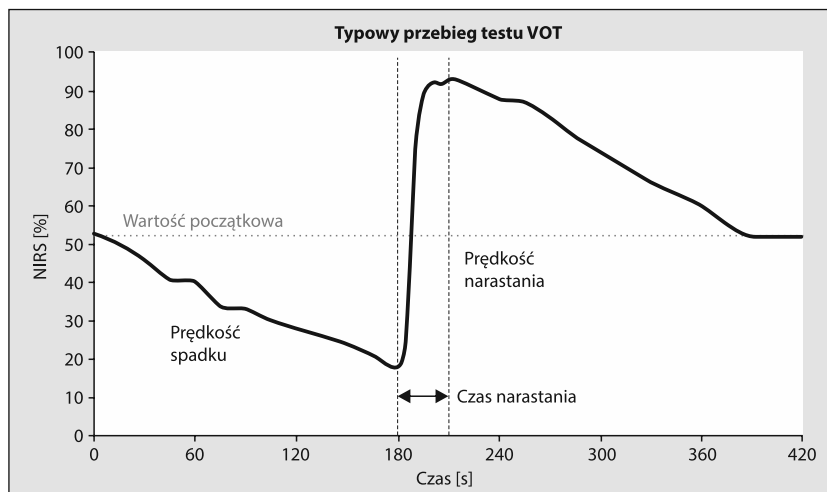
się do badania saturacji mózgowej. Podejmowano próby oceny saturacji tkankowej nerek, jelit, wątroby, a także mięśni piersiowych i naramiennych. Podczas operacji kardiologicznych u noworodków czujnik spektrofotometryczny wykorzystuje się do monitorowania saturacji tkankowej w nerce. Zaobserwowano, że jej małe wartości są związane z większym stężeniem kreatyniny po operacji i ryzykiem ostrego uszkodzenia nerek [31]. Podejmowano także próby wykorzystania oksymetru do pomiaru saturacji wątroby, dotychczas nie wykazano jednak wynikających z tego korzyści klinicznych [32]. U noworodków operowanych z powodu wrodzonych wad serca saturacja trzewna, mierzona podczas odłączania krążenia pozaustrojowego czujnikiem umieszczonym bezpośrednio poniżej pępka, okazała się parametrem pozwalającym przewidzieć zwiększone zapotrzebowanie na leki obkurczające naczynia i wydłużenie czasu sztucznej wentylacji płuc, dokładniej niż saturacja nerkowa i mózgowa [33]. Interesującą koncepcję wykorzystania oksymetrii tkankowej u noworodków zaproponowali Fortune i wsp. [34], którzy wskazali na znaczenie ilorazu saturacji mózgowej i trzewnej (CSOR, *cerebro-splanchnic oxygenation ratio*). W warunkach prawidłowych, ze względu na wyższą ekstrakcję tlenu w mózgu, wartość saturacji mózgowej jest mniejsza od saturacji trzewnej. Zwiększenie ilorazu powyżej jedności wskazuje na ryzyko niedokrwienia jelit, najczęściej w wyniku obkurczenia naczyń trzewnych wskutek centralizacji krążenia.

ZASTOSOWANIE OKSYMETRII DO OCENY MIKROKRĄŻENIA I ŻUŻYCIA TLENU W TKANKACH

Zastosowanie pomiaru saturacji tkankowej w mięśniach do oceny zużycia tlenu w tkance i reaktywności mikrokrążenia podczas sztucznie wywołanego krótkotrwałego niedokrwienia i następującej po nim reperfuzyj zaproponowali Gomez i wsp. [35]. Wykorzystywany w tym celu tak zwany test okluzji przepływu (VOT, *vascular occlusion test*) polega na analizie przebiegu zmian saturacji tkankowej w mięśniach

w trakcie i bezpośrednio po krótkotrwałym zamknięciu przepływu krwi w badanej kończynie za pomocą sfigmomanometru (ryc. 3). Podczas testu ustala się wyjściową wartość saturacji mięśnia, po czym następuje wypełnienie mankieta powyżej ciśnienia skurczowego i zamknięcie dopływu krwi. Po zaplanowanym czasie następuje opróżnienie mankieta i przywrócenie przepływu. W następstwie przemijającej hipoksji, podczas reperfuzyj następuje rozszerzenie tętniczek, zwiększenie przepływu przez kapilary i reaktywne przekrwienie [36]. W teście VOT ocenie podlega szybkość zmniejszania się saturacji mięśnia po zamknięciu przepływu, a także czas od zwolnienia mankieta do osiągnięcia maksymalnej saturacji, gdy następuje wypłukanie nieutlenowanej hemoglobiny. Postuluje się, że szybkość zmniejszania się saturacji w mięśniu jest proporcjonalna do zużycia tlenu, natomiast szybkość zwiększania się saturacji po przywróceniu przepływu uważana jest za wykładnik wydolności mechanizmów rozszerzających naczynia [35]. Czujnik oksymetryczny umieszcza się w różnych miejscach — najczęściej na kłębie kciuka, ale także ponad grupą zginaczy na przedramieniu lub na mięśniach łydki. Porównywanie wyników utrudnia stosowanie różnych progów niedokrwienia, określanych bądź czasem niedokrwienia, wynoszącym 3 lub 5 min, albo też określoną wartością saturacji tkankowej, po osiągnięciu której następuje przywrócenie przepływu. Przykład wykresu oksymetrii tkankowej podczas testu VOT przedstawiono na rycinie 4.

W ostatnich latach ukazało się wiele prac, w których odnoszono dane otrzymywane podczas testu okluzji przepływu do parametrów stanu chorego monitorowanych rutynowo w intensywnej terapii. Zaobserwowano, że mniejszym wartościom wyjściowym saturacji tkankowej towarzyszy zwiększone stężenie mleczanów, a także obecność klinicznych objawów hipoperfuzyj obwodowej, takich jak różnica temperatur między przedramieniem i opuszką palca przekraczająca 4° C oraz wydłużony czas napływu kapilarnego [37]. Lima i wsp. [38] zaobserwowali u chorych z kwasicią mleczanową przyjmowanych na OIT, że utrzymywanie się



Rycina 4. Typowy przebieg zmian saturacji tkankowej podczas testu okluzji przepływu

po resuscytacji płynowej zmniejszonej saturacji tkankowej w mięśniach kłębu było związane z większą liczbą niewydolnych narządów.

Próby wykorzystania testu okluzji przepływu do klinicznej oceny mikrokrążenia podejmowano początkowo u chorych we wstrząsie septycznym. Obserwacja, że wyjściowe wartości saturacji tkankowej w mięśniach są u nich zmniejszone [39, 40], nie znalazła potwierdzenia w innych badaniach [41, 42]. Pareznik i wsp. [42] wykazali, że szybkość zmniejszania się saturacji tkankowej podczas zatrzymania przepływu w kończynie była mniejsza u chorych we wstrząsie septycznym niż u pozostałych badanych co tłumaczono upośledzeniem zdolności do ekstrakcji tlenu i jego zużycia w tkankach u tych chorych. U pacjentów, którzy przeżyli, obserwowano przywrócenie szybkości zmniejszania się saturacji podczas testu VOT.

Nie mniej istotnych informacji o stanie mikrokrążenia u chorych we wstrząsie septycznym dostarcza interpretacja szybkości narastania saturacji tkankowej po przywróceniu przepływu podczas testu VOT. W wielu badaniach potwierdzono, że u chorych z sepsą po przywróceniu przepływu saturacja tkankowa ulega zwiększeniu znacznie wolniej niż u chorych bez stwierdzonego zakażenia i u zdrowych ochotników [39, 40]. Utrzymywanie się zwolnionego zwiększania się saturacji po 24 godzinach leczenia jest związane z gorszym rokowaniem [39]. Stwierdzono także, że we wstrząsie septycznym saturacja tkankowa ulegała zwiększeniu znacznie szybciej u chorych, którzy przeżyli w porównaniu do tych, którzy zmarli [39, 43].

Georger i wsp. [44] wykorzystali pomiar saturacji tkankowej w mięśniach kłębu do oceny wpływu noradrenaliny na mikrokrążenie u chorych we wstrząsie septycznym. Zaobserwowali oni, że noradrenalina paradoksalnie powoduje nie tylko zwiększenie saturacji tkankowej, ale także przy-

spieszenie jej narastania podczas reperfuzji po teście okluzji przepływu. Masip i wsp. [45] stwierdzili na podstawie testu VOT, że u chorych we wstrząsie septycznym podanie aktywowanej drotrekoginy alfa (aktywowane białko C wytwarzane metodami inżynierii genetycznej, obecnie wycofane z obrotu) wywiera korzystny wpływ na perfuzję tkankową. Autorzy podkreślali, że badanie perfuzji tkankowej przy pomocy testu VOT u chorych we wstrząsie septycznym pozwala ocenić ryzyko zgonu z dużą czułością i swoistością.

Próby oceny przydatności klinicznej testu VOT obejmowały także chorych zagrożonych wystąpieniem wstrząsu krwotocznego po urazie. Postulowano, że w tej grupie chorych test okluzji przepływu umożliwi wykrycie wczesnej, maskowanej przez działanie mechanizmów kompensacyjnych, fazy rozpoczynającego się wstrząsu [46]. Rutynowo badane parametry, takie jak ciśnienie tętnicze, częstość akcji serca i stężenie mleczanu, nie wykazują w tym okresie odchyień od wartości prawidłowych, natomiast narastanie saturacji tkankowej podczas reperfuzji jest znacznie wolniejsze [46].

Przydatność testu okluzji przepływu oceniano także u chorych w krańcowej niewydolności krążenia, u których zaobserwowano istotne zmniejszenie wyjściowych wartości saturacji w mięśniach, w porównaniu do zdrowych ochotników. Wykazano korzystny wpływ infuzji dobutaminy i levosimendanu na wartości saturacji tkankowej rejestrowane u tych chorych, przy czym poprawa dotyczyła zarówno wartości wyjściowych, jak i szybkości narastania saturacji tkankowej [47].

PODSUMOWANIE

Spektroskopia w bliskiej podczerwieni jest techniką stwarzającą nowe możliwości oceny utlenowania mózgu, a także innych narządów. Obecnie jej najważniejszym i naj-

lepiej udokumentowanym klinicznie zastosowaniem jest zapobieganie powikłaniom neurologicznym i zaburzeniom funkcji poznawczych u chorych poddanych operacji serca i aorty piersiowej. Wartości wyjściowe saturacji mózgowej mogą stanowić ważny parametr pozwalający przewidywać rokowanie w kardiologii. Korzyści wynikające z zastosowania monitorowania saturacji mózgowej obserwowane w dotychczasowych badaniach, a także możliwości wykorzystania pomiaru saturacji tkankowej do oceny mikrokrążenia, wskazują, że może ona być parametrem przydatnym do oceny stanu chorego i rokowania w anestezjologii i intensywnej terapii. Ważne pytania dotyczące najmniejszych bezpiecznych wartości saturacji mózgowej, a także stopień jej zmniejszenia, który wskazuje na istotne zwiększenie ryzyka powikłań, pozostają nadal bez odpowiedzi [11]. Istniejące ograniczenia interpretacji oksymetrii tkankowej nie przekreślają jednak korzyści płynących z jej monitorowania, a szybki postęp obserwowany w rozwoju technologii NIRS może pozwolić na ich rychłe wyeliminowanie. Pomimo braku jednoznacznych procedur monitorowania saturacji mózgowej, nie można zaprzeczyć, że wobec braku innych łatwych do stosowania i jednocześnie rzetelnych parametrów bezpośrednio określających perfuzję tkanek, stanowi ona znaczące uzupełnienie informacji o stanie chorego. Ponadto umożliwia anestezjologowi podjęcie interwencji w celu zapobiegania wystąpieniu powikłań neurologicznych, zwiększając bezpieczeństwo znieczulenia.

PODZIĘKOWANIA

1. Praca nie była finansowana.
2. Autorzy deklarują brak konfliktu interesów.

Piśmiennictwo

1. *Jöbsis FF*: Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science* 1977; 198: 1264–1267.
2. *Murkin JM, Arango M*: Near-infrared spectroscopy as an index of brain and tissue oxygenation. *Br J Anaesth* 2009; 103: i3–i13. doi: 10.1093/bja/aep299.
3. *Nagdyman N, Fleck T, Schubert S et al.*: Comparison between cerebral tissue oxygenation index measured by near-infrared spectroscopy and venous jugular bulb saturation in children. *Intensive Care Med* 2005; 31: 846–850.
4. *Yoshitani K, Kawaguchi M, Miura N et al.*: Effect of hemoglobin concentration, skull thickness, and the area of the cerebrospinal fluid layer on near-infrared spectroscopy measurements. *Anesthesiology* 2007; 106: 458–462.
5. *Zanatta P, Forti A*: Effectiveness of NIRS to sample the frontal brain cortex in all cardiac surgery patients. *Minerva Anestesiol* 2011; 77: 1124–1125.
6. *Casati A, Fanelli G, Pietropaoli P et al.*: Continuous monitoring of cerebral oxygen saturation in elderly patients undergoing major abdominal surgery minimizes exposure to potential hypoxia. *Anesth Analg* 2005; 101: 740–747.
7. *Slater JP, 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.
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: 371–379.

9. *Sorensen H, Secher NH, Siebenman C et al.*: Cutaneous vasoconstriction affects near-infrared spectroscopy determined cerebral oxygen saturation during administration of norepinephrine. *Anesthesiology* 2012; 117: 263–270.
10. *Murkin JM*: Is it better to shine a light, or rather to curse the darkness? Cerebral near-infrared spectroscopy and cardiac surgery. *Eur J Cardio-Thorac Surg* 2013; 43: 1081–1083. doi: 10.1093/ejcts/ezt186.
11. *Grocott HP, Davie SN*: Future uncertainties in the development of clinical cerebral oximetry. *Front Physiol* 2013; 4: 360. doi: 10.3389/fphys.2013.00360.
12. *Vernick WJ, Gutsche JT*: Pro: Cerebral oximetry should be a routine monitor during cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2013; 27: 385–389.
13. *Yao FF, Tseng CA, Ho CA, Levin SK, Illner P*: Cerebral oxygen desaturation is associated with early postoperative neuropsychological dysfunction in patient undergoing cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2004; 18: 552–558. doi: 10.1053/j.jvca.2004.07.007.
14. *Lassnigg A, Hiesmayr M, Keznicki P, Mullner T, Ehrlich M, Grubhofer G*: Cerebral Oxygenation during cardiopulmonary bypass measured by near-infrared spectroscopy: Effects of hemodilution, temperature, and flow. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 1999; 13: 544–548.
15. *Deschamps A, Lambert J, Couture et al.*: Reversal of decreases in cerebral saturation in high-risk cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2013; 27: 1260–1266. doi: 10.1053/j.jvca.2013.01.019.
16. *Murkin JM, Adams SJ, Novick RJ et al.*: Monitoring brain oxygen saturation during coronary bypass surgery: A randomized, prospective study. *Anesth Analg* 2007; 104: 51–58. doi: 10.1213/01ane.0000246814.29362.f4.
17. *Moerman A, Vandenplas G, Bove T, Wouters PF, De Hert SG*: Relation between mixed venous oxygen saturation and cerebral oxygen saturation measured by absolute and relative near-infrared spectroscopy during off-pump coronary artery bypass grafting. *Br J Anaesth* 2013; 110: 258–265. doi: 10.1093/bja/aest375.
18. *Paquet C, Deschamps A, Denault AY et al.*: Baseline regional cerebral oxygen saturation correlates with left ventricular systolic and diastolic function. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2008; 22: 840–846. doi: 10.1053/j.jvca.2008.02.013.
19. *Heringlake M, Garbers C, Käbler JH et al.*: Preoperative cerebral oxygen saturation and clinical outcomes in cardiac surgery. *Anesthesiology* 2011; 114: 58–69. doi: 10.1097/ALN.0b013e3181fef34e.
20. *Zheng F, Sheinberg R, Yee MS, Ono M, Zheng Y, Hogue CW*: Cerebral near-infrared spectroscopy (NIRS) monitoring and neurologic outcomes in adult cardiac surgery: A systematic review. *Anesth Analg* 2013; 116: 663–676. doi: 10.1213/ANE.0b013e318277a255.
21. *Kucwicz-Czech E, Urbańska E, Wolski P et al.*: Monitorowanie regionalnej saturacji mózgowej podczas zabiegów kardiologicznych — algorytm postępowania. *Kardiolog Torako-chir* 2011; 4: 504–508.
22. *Moritz S, Kasprzak P, Arlt M, Taeger K, Metz C*: Accuracy of cerebral monitoring in detecting cerebral ischemia during carotid endarterectomy: a comparison of transcranial Doppler sonography, near-infrared spectroscopy, stump pressure, and somatosensory evoked potentials. *Anesthesiology* 2007; 107: 563–569.
23. *Hirofumi O, Otone E, Hiroshi I et al.*: The effectiveness of regional cerebral oxygen saturation monitoring using near-infrared spectroscopy in carotid endarterectomy. *J Clin Neurosci* 2003; 10: 79–83. doi: 10.1016/S0967-5868(02)00268-0.
24. *Carlin RE, McGraw DJ, Calimlim JR, Mascia ME*: The use of near-infrared cerebral oximetry in awake carotid endarterectomy. *J Clin Anesth* 1998; 10: 109–113. doi: 10.1016/S0952-8180(97)00252-3.
25. *Grubhofer G, Plöchl W, Skolka M, Czemy M, Ehrlich M, Lassnigg A*: Comparing Doppler ultrasonography and cerebral oximetry as indicators for shunting in carotid endarterectomy. *Anesth Analg* 2009; 91: 1339–1344.
26. *Mille T, Tachimiri ME, Klersy C et al.*: Near infrared spectroscopy monitoring during carotid endarterectomy: which threshold value is critical? *Eur J Vasc Endovasc Surg* 2004; 27: 646–650.
27. *Al-Rawi PG, Kirkpatrick PJ*: Tissue oxygen index: thresholds for cerebral ischemia using near-infrared spectroscopy. *Stroke* 2006; 37: 2720–2725.
28. *Kazan R, Bracco D, Hemmerling TM*: Reduced cerebral oxygen saturation measured by absolute cerebral oximetry during thoracic surgery correlates with postoperative complication. *Br J Anaesth* 2009; 103: 811–816. doi: 10.1093/bja/aep.309.
29. *Tang L, Kazan R, Taddei R, Zaouter C, Cyr S, Hemmerling TM*: Reduced cerebral oxygen saturation during thoracic surgery predicts early postoperative cognitive dysfunction. *Br J Anaesth* 2012; 108: 623–629. doi: 10.1093/bja/aer501.

30. *Casati A, Fanelli G, Pietropaoli P et al.*: Monitoring cerebral oxygen saturation in elderly patients undergoing general abdominal surgery: a prospective cohort study. *Eur J Anaesthesiol* 2007; 24: 59–65.
31. *Owens GE, King K, Gurney JG, Charpie JR*: Low renal oximetry correlates with acute kidney injury after infant cardiac surgery. *Pediatr Cardiol* 2011; 32: 183–188. doi: 10.1007/s00246-010-9839-x.
32. *Weiss M, Schulz G, Teller I et al.*: Tissue oxygenation monitoring during major pediatric surgery using transcutaneous liver near infrared spectroscopy. *Paediatr Anaesth* 2004; 14: 989–995.
33. *Kim JW, Shin WJ, Park I, Chung IS, Gwak M, Hwang GS*: Splanchnic oxygen saturation immediately after weaning from cardiopulmonary bypass can predict early postoperative outcomes in children undergoing congenital heart surgery. *Pediatr Cardiol* 2014; 35: 587–595. doi: 10.1007/s00246-013-0824-z.
34. *Fortune PM, Wagstaff M, Petros AJ*: Cerebro-splanchnic oxygenation ratio (CSOR) using near infrared spectroscopy may be able to predict splanchnic ischaemia in neonates. *Intensive Care Med* 2001; 27: 1041–1407. doi: 10.1007/s001340100994.
35. *Gómez H, Torres A, Polanco P et al.*: Use of non-invasive NIRS during a vascular occlusion test to assess dynamic tissue O₂ saturation response. *Intensive Care Med* 2008; 34: 1600–1607. doi: 10.1007/s00134-008-1145-1.
36. *Vallet B*: Vascular reactivity and tissue oxygenation. *Intensive Care Med* 1998; 24: 3–11.
37. *Lima A, van Bommel J, Sikorska K et al.*: The relation of near-infrared spectroscopy with changes in peripheral circulation in critically ill patients. *Crit Care Med* 2011, 39: 1649–1654. doi: 10.1097/ccm.0b013e3182186675.
38. *Lima A, van Bommel J, Jansen TC, Ince C, Bakker J*: Low tissue oxygen saturation at the end of early goal-directed therapy is associated with worse outcome in critically ill patients. *Crit Care* 2009; 13 (Suppl 5): S13. doi: 10.1186/cc8011.
39. *Creteur J, Carollo T, Soldati G, Buchele G, De Backer D, Vincent JL*: The prognostic value of muscle StO₂ in septic patients. *Intensive Care Med* 2007; 33: 1549–1556.
40. *Skarda DE, Mulier KE, Myers DE, Taylor JH, Beilman GJ*: Dynamic near-infrared spectroscopy measurements in patients with severe sepsis. *Shock* 2007; 27: 348–353.
41. *De Blasi RA, Palmisani S, Mercieri M et al.*: Microvascular dysfunction and skeletal muscle oxygenation assessed by phase-modulation near-infrared spectroscopy in patients with septic shock. *Intensive Care Med* 2005; 31: 1661–1668.
42. *Pareznik R, Knezevic R, Voga G, Podbregar M*: Changes in muscle tissue oxygenation during stagnant ischemia in septic patients. *Intensive Care Med* 2006; 32: 87–92.
43. *Saphiro NI, Arnold R, Sherwin R et al.*: The association of near-infrared spectroscopy derived tissue oxygenation measurements with sepsis syndromes, organ dysfunction and mortality in emergency department patients with sepsis. *Crit Care* 2011; 15: R223, doi: 10-1007/s11739-013-0973-3.
44. *Georger JF1, Hamzaoui O, Chaari A, Maizel J, Richard C, Teboul JL*: Restoring arterial pressure with norepinephrine improves muscle tissue oxygenation assessed by near-infrared spectroscopy in severely hypotensive septic patients. *Intensive Care Med* 2010; 36: 1882–1889. doi: 10.1007/s00134-010-2013-3.
45. *Masip J, Mesquida J, Luengo C et al.*: Near-infrared spectroscopy StO₂ monitoring to assess the therapeutic effect of drotrecogin alfa (activated) on microcirculation in patients with severe sepsis or septic shock. *Ann Intensive Care* 2013; 3: 30. doi: 10.1186/2110-5820-3-30.
46. *Smith J, Bricker S, Putnam B*: Tissue oxygen saturation predicts the need for early blood transfusion in trauma patients. *Am Surg* 2008; 74: 1006–1011.
47. *Nanas S, Gerovasilis V, Dimopoulos S et al.*: Inotropic agents improve the peripheral microcirculation of patients with end-stage chronic heart failure. *J Card Fail* 2008; 14: 400–406. doi: 10.1016/j.cardfail.2008.02.001.

Adres do korespondencji:

dr n. med. Aleksandra Biedrzycka
 Uniwersyteckie Centrum Kliniczne
 ul. Dębinki 7, 80–952 Gdańsk
 e-mail: biedrzycka.ola@gmail.com

Otrzymano: 9.04.2015 r.

Zaakceptowano: 29.07.2015 r.