



УДК 616.12-089

DOI 10.17802/2306-1278-2024-13-4S-241-253

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ МЕТОДА БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ПРОФИЛАКТИКЕ ЦЕРЕБРАЛЬНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ ХИРУРГИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ВРОЖДЕННЫХ ПОРОКОВ СЕРДЦА У ДЕТЕЙ

А.А. Михайлова, А.А. Ивкин, Е.В. Григорьев

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний», бульвар им. академика Л.С. Барбараша, 6, Кемерово, Российская Федерация, 650002

Основные положения

• С учетом развития методик искусственного кровообращения при операциях на сердце у детей первостепенное значение имеет проблема интраоперационной защиты органов, в частности церебропротекция – одна из главных задач ведения пациента. Цель данного обзора литературы – определить роль ближневолновой инфракрасной спектроскопии среди множества аппаратных методик мониторинга функции мозга.

Резюме

Ближневолновая инфракрасная спектроскопия используется для оценки регионарной тканевой перфузии и оксигенации тканей головного мозга во время операций на сердце, проводимых в условиях искусственного кровообращения (ИК). Данные о корреляции лабораторных маркеров церебрального повреждения с результатами церебральной оксиметрии у детей делают возможным создание эффективных стратегий церебропротекции и профилактики послеоперационной когнитивной дисфункции как части комплексной интраоперационной оценки состояния пациента. Целью представленной работы стал анализ эффективности метода ближней инфракрасной спектроскопии в церебропротекции при коррекции врожденных пороков сердца у детей в условиях ИК. Выполнен обзор литературных источников на русском и английском языках, представленных в базах данных Web of Science, PubMed и eLIBRARY за последние десять лет. Поиск релевантных исследований осуществлен по ключевым словам: «органопротекция», «врожденные пороки сердца», «дети», «искусственное кровообращение», «спектроскопия в около-инфракрасном спектре». Источники, не соответствующие заданным критериям, исключены из обзора. Обосновано применение ближней инфракрасной спектроскопии для оценки церебральной перфузии с целью церебропротекции у детей с врожденными пороками сердца. Показана эффективность церебральной оксиметрии при различных видах оперативных вмешательств на сердце в условиях ИК у детей. Ближневолновая инфракрасная спектроскопия – рутинная методика оценки перфузии мозга для профилактики церебрального повреждения при операциях на сердце в условиях ИК. Приведенные в обзоре данные демонстрируют связь лабораторных маркеров церебрального повреждения с показателями интраоперационной церебральной оксиметрии методом ближней инфракрасной спектроскопии у детей при операциях на сердце в условиях ИК. Необходимы дальнейшие исследования для изучения перспектив описанного метода церебропротекции.

Ключевые слова

Ближневолновая инфракрасная спектроскопия • Врожденные пороки сердца • Дети • Искусственное кровообращение

Поступила в редакцию: 13.10.2024; поступила после доработки: 05.11.2024; принята к печати: 14.12.2024

Для корреспонденции: Алена Александровна Михайлова, carfagenez@mail.ru; адрес: бульвар им. академика Л.С. Барбараша, 6, Кемерово, Россия, 650002

Corresponding author: Alena A. Mikhailova, carfagenez@mail.ru; address: 6, Acad. Barbarash blvd., Kemerovo, Russia, 650002

DIAGNOSTIC SIGNIFICANCE OF THE NEAR-INFRARED SPECTROSCOPY IN THE PREVENTION OF CEREBRAL INJURY DURING SURGICAL CORRECTION OF CONGENITAL HEART DEFECTS IN CHILDREN

A.A. Mikhailova, A.A. Ivkin, E.V. Grigoriev

Federal State Budgetary Institution "Research Institute for Complex Issues of Cardiovascular Diseases", 6, Acad. L.S. Barbarash blvd., Kemerovo, Russian Federation, 650002

Highlights

- With the recent advancement in cardiopulmonary bypass techniques in pediatric cardiac surgery, the issue of organ protection during surgery is becoming more urgent, in particular cerebral protection is turning into one of the most important parts of patient management. The aim of this literature review is to determine the role of near-infrared spectroscopy among a variety of techniques for monitoring cerebral function.

Abstract

Near-infrared spectroscopy evaluates regional tissue perfusion and oxygenation of brain tissues during cardiac surgery with cardiopulmonary bypass (CPB). Data on the correlation of laboratory markers of cerebral injury and indicators of cerebral oximetry in children make it possible to create effective strategies of cerebral protection and prevention of postoperative cognitive dysfunction as part of a comprehensive intraoperative assessment of the patient's condition. The aim of the article was to analyze the effectiveness of the near-infrared spectroscopy in cerebral protection during surgical correction of congenital heart defects with CPB in children. The search for Russian and English publications (up to 10 years old) was performed using the following databases: Web of Science, PubMed, E-library. The keywords for the search were: "organ protection", "congenital heart defects", "children", "cardiopulmonary bypass", "near-infrared spectroscopy". Publications that did not meet the specified criteria were excluded from the analysis. The findings substantiate the use of near-infrared spectroscopy to assess cerebral perfusion for the purpose of cerebral protection in children with congenital heart defects. The effectiveness of cerebral oximetry in various types of cardiac surgery with CPB in children has been shown. Near-infrared spectroscopy is a routine technique for assessing cerebral perfusion for the prevention of cerebral injury during cardiac surgery with CPB. The data presented in the review demonstrate the relationship between laboratory markers of cerebral injury and indicators of intraoperative cerebral oximetry using near-infrared spectroscopy in children during cardiac surgery with CPB. Further research is needed to explore the prospects of the described method of cerebral protection.

Keywords

Near-infrared spectroscopy • Congenital heart defects • Children • Cardiopulmonary bypass

Received: 13.10.2024; received in revised form: 05.11.2024; accepted: 14.12.2024

Список сокращений

АД — артериальное давление	ИК — искусственное кровообращение
ВПС — врожденные пороки сердца	NIRS — ближневолновая инфракрасная спектроскопия

Введение

Ведущими причинами заболеваемости и смертности после кардиохирургических операций остаются неврологические и когнитивные осложнения как следствие перенесенной интраоперационной церебральной гипоксии и искусственного кровообращения (ИК). Спектрофотометрия в ближнем инфракрасном диапазоне (NIRS) является перспективным методом неинвазивного мониторинга церебральной оксигенации и гемодинамики. Существует необходимость обоснования перспективы применения NIRS как метода оценки степени тя-

жести церебральной гипоксии во время кардиохирургических вмешательств на большом количестве пациентов детского возраста, прежде чем он станет рутинным при церебропротекции [1].

NIRS занимает оправданное место в гемодинамическом мониторинге у пациентов, которым выполняются операции на сердце с использованием ИК [2]. В международном опросе, проведенном среди перфузиологов, применение NIRS во время экстракорпорального кровообращения составило 74%. D.A. Brandoni и соавт., сравнивая измеренную методом NIRS церебральную оксигенацию, среднее

артериальное давление (АД), уровни лактата и объемную скорость перфузии при операциях на сердце у детей в условиях ИК и с индуцированной гипотермией, пришли к выводу, что измерение насыщения тканей головного мозга кислородом методом NIRS следует считать эффективным и безопасным способом мониторинга потребления кислорода тканями головного мозга и церебропротекции [3].

Периоперационные стратегии мониторинга глобальных или региональных переменных транспортировки кислорода крайне важны, особенно при проведении гипотермического ИК со сниженным кровотоком или глубоким гипотермическим циркуляторным арестом. Описаны способы оценки церебральной оксигенации: инвазивная оксиметрия яремной вены ($SjvO_2$) как интегральный метод оценки соотношения доставки и потребления кислорода, а также метод NIRS. Эти данные демонстрируют значимость мониторинга параметров циркулирующей крови в поддержании тканевой оксигенации и значений NIRS, основанных на уровне гемоглобина. В последнее время мониторинг церебральной оксиметрии (ScO_2) стал широко распространен в педиатрической кардиохирургии. В исследовании М. Yamamoto и соавт. отмечено, что среднее АД является основным фактором, влияющим на церебральную оксигенацию и перфузию при операциях на сердце в условиях ИК у детей, вес которых составляет менее 10 кг [4]. Предполагается, что эта связь может быть обусловлена несовершенной ауторегуляцией центральной гемодинамики у детей раннего возраста. Периоперационное применение NIRS для мониторинга регионарной оксиметрии и перфузии тканей при проведении различных операций детям вызывает все больший интерес в неонатальной медицине. Растет вклад периоперационного мониторинга NIRS в оценку роли церебральной гемодинамики, которая дополняет клиническую картину, а также может способствовать появлению новых данных о физиологии кровообращения и перфузии мозга у новорожденных [5].

Периоперационное применение NIRS для мониторинга региональной тканевой оксигенации и перфузии как в кардиохирургии, так и при проведении некардиохирургических вмешательств динамично развивается в неонатальной медицине. При любом типе хирургических операций у детей (в том числе при коррекции ВПС) может нарушаться соотношение доставки и потребления кислорода тканями, а также увеличиваться риск задержки психомоторного развития. Для профилактики подобных повреждений у новорожденных детей в сочетании с традиционными методами мониторинга предлагается применение ближней инфракрасной спектроскопии с целью оптимизации стратегий искусственного кровообращения [6].

Физическое обоснование метода

Оценка церебральной оксигенации с помощью NIRS предполагает использование волн света ближнего инфракрасного диапазона, который может проникать в ткани организма, где он поглощается молекулами окси- и дезоксигемоглобина, имеющими различные спектры поглощения. Эта спектральная разница используется для определения насыщения тканей кислородом, в том числе при традиционной пульсоксиметрии. В биофизике существует закон Бера – Ламберта, описывающий ослабление параллельного монохроматического пучка света при распространении его в поглощающей среде. Пространственная спектроскопия (SRS) и временная спектроскопия (TRS) являются ключевыми концепциями NIRS, используемыми для оценки церебральной перфузии и оксигенации [7].

Данные аппаратной NIRS отражают локальное соотношение доставки и потребления кислорода, которое меняется под влиянием множества факторов, в том числе эффектов ИК (гипотермия, гемодилюция, изменение уровней PaO_2 и $PaCO_2$) [8]. Стандартное двухканальное устройство NIRS используется для определения глобальной гипоперфузии мозга в области фронтальной коры. Однако фокальные ишемические поражения могут быть упущены во многих случаях в связи с ограниченной зоной охвата сигнала. В настоящее время разрабатываются многоканальные устройства NIRS, обеспечивающие лучший пространственный охват. Ограничения разработки и клинического применения таких устройств во время хирургической коррекции ВПС у детей вызваны в основном дороговизной и сложностью технического применения подобного оборудования [9], что также показано в исследовании O.F. Savluk и соавт. в группе из 20 пациентов детского возраста, перенесших операции на сердце в условиях ИК с проведением мониторинга церебральной оксигенации методом NIRS [10].

Физиологическое обоснование методики NIRS

Отток венозной крови из головного мозга осуществляется через внутренние яремные вены, исследование образцов крови из которых может точно отражать отношение между доставкой и потреблением кислорода тканями мозга. Нормальное значение $SjvO_2$ составляет от 54 до 75% [11]. Доставка кислорода к тканям головного мозга превышает его потребление, если $SjvO_2 > 75\%$. Значения ниже 50% означают, что обеспечение мозга кислородом ниже его потребления. Известно, что если уровень мозгового кровотока не может удовлетворить потребности церебрального метаболизма, может возникнуть циркуляторная гипоксия. Когда значение $SjvO_2$ составляет менее 40%, может возникнуть церебральная аноксия. Так, показано, что $SjvO_2$

ниже 55% было связано с двукратным увеличением вероятности неблагоприятных неврологических исходов у пациентов детского возраста. Венозная сатурация кислорода во внутренней яремной вене также зависит от тактики проведения ИК, температуры тела пациента, pH крови, артериального давления, типа оксигенатора и возраста пациента. У многих детей с ВПС уровень ScO_2 ниже, чем у здоровых детей, что можно объяснить их анатомо-физиологическими особенностями. Пациенты с ScO_2 ниже ранее указанных нормальных значений должны рассматриваться физиологически как имеющие аномальную базу с показателями, близкими к тем, которые связаны с травмой мозга в лабораторных исследованиях. Нормальные вычисленные значения ScO_2 варьируют в зависимости от типа популяции пациентов и фирмы-изготовителя прибора для NIRS. Средние значения ScO_2 у здоровых детей составляют $68 \pm 10\%$, а у младенцев – $64 \pm 5\%$ [12]. У пациентов без объемных образований черепа, аномальной анатомии головы, цереброваскулярных заболеваний или аномалий развития дуги аорты зачастую не наблюдается значительной разницы между показателями церебральной оксиметрии между левым и правым полушариями, поэтому интраоперационное использование только левого или правого двуканального датчика прибора NIRS может не исказить результаты обследования. Индивидуальные различия в церебральной перфузии могут повлиять на показатели региональной церебральной оксиметрии на различных этапах хирургии дуги аорты у детей.

Некоторые источники сообщают, что насыщение кислородом тканей можно выразить как функцию сатурации артериальной крови кислородом (SaO_2), концентрации гемоглобина в крови, кровотока в тканях и метаболической скорости тканей для кислорода. Например, в исследовании A.N. Naguib и соавт. среди параметров, которые могут повлиять на насыщение кислородом тканей, описаны SaO_2 , гематокрит, среднее АД и центральное венозное давление, а также pCO_2 и pH венозной и артериальной крови. Показано, что среднее АД – основной фактор, обеспечивающий адекватную церебральную оксигенацию при операциях на сердце в условиях ИК у детей массой менее 10 кг [13].

Ограничения и преимущества метода NIRS

Различные устройства предоставляют информацию об изменениях уровней гемоглобина, насыщенного кислородом (HbO_2), и дезоксигенированного гемоглобина (Hb) или регионарной сатурации тканей мозга (rSO_2). В различных исследованиях описано применение метода NIRS у пациентов во время сердечно-сосудистых операций у взрослых и детей с глубоким гипотермическим циркуляторным арестом и без него. В большинстве исследований

с помощью NIRS были обнаружены значительные изменения в церебральной оксиметрии. Показатели NIRS коррелируют с уровнем церебрального метаболизма кислорода и видом проводимого оперативного лечения. Однако клинические, экспериментальные и теоретические проблемы вызывают сомнения относительно клинической значимости насыщения гемоглобина в условиях гипотермии и алкалоза, поскольку при этом сродство гемоглобина с кислородом увеличивается и высокое значение rSO_2 может всего лишь отражать недостаточный транспорт кислорода в клетки [14].

В исследовании Y. Ma и соавт. также показано применение NIRS одновременно с измерением центральной венозной сатурации (ScvO_2) при операциях по коррекции ВПС у детей. Значение rScO_2 , измеренное с помощью NIRS, в некоторой степени отражало SjvO_2 и ScvO_2 , контролируемых инвазивно. Однако широкие пределы корреляции между rScO_2 и SjvO_2 , а также ScvO_2 указывают на то, что показатели NIRS и SjvO_2 , а также ScvO_2 не являются взаимозаменяемыми. Необходимы дополнительные исследования для определения роли NIRS в мониторинге церебральной оксигенации у детей с ВПС [15]. Наиболее часто используемой техникой является определение SjO_2 и rSO_2 с помощью NIRS, которые представляют собой глобальную (полушарную) и региональную сатурацию тканей головного мозга соответственно. NIRS имеет преимущество, так как является неинвазивным методом, представляет собой динамический показатель в реальном времени, не требуя наличия пульсирующего кровотока, как это необходимо при проведении пульсоксиметрии, и эффективен во время ИК в гипотермическом режиме [16]. Использование церебральной NIRS обеспечивает надежные показатели венозной сатурации тканей, расположенных под датчиками, особенно у новорожденных детей и детей раннего возраста в связи с небольшими размерами черепа. Показано, что региональная оксиметрия головного мозга коррелирует с отдаленными неврологическими исходами в экспериментах по церебральной ишемии-гипоксии. У лабораторных животных, подвергнутых гипоксии в эксперименте, снижение показателей NIRS было ассоциировано с послеоперационной когнитивной дисфункцией, интраоперационным снижением уровня церебральной перфузии, а также с увеличением уровня лактата – маркера формирующейся кислородной задолженности при снижении rSO_2 до 44, 42 и 33% соответственно. Показано, что во время согревания при ИК пациент подвержен наибольшему риску церебральной гипоксии независимо от уровня SaO_2 [17].

Интерпретация данных NIRS ограничена техническими особенностями данной методики и отсутствием надежных контрольных значений или

критических порогов в определенных популяциях пациентов. Приблизительно 70% полученного сигнала NIRS происходит из венозного отдела, тогда как капилляры и артериолы вносят 20 и 10% соответственно. Таким образом, индекс тканевой оксигенации отражает SvO₂ в головном мозге лишь частично, варьируя не только с изменениями в тканевой перфузии или оксигенации, но и с изменениями в относительном распределении объема крови между артериолами, капиллярами и венозными отделами в пределах обследуемого участка ткани. Клиническое значение мониторинга NIRS также усложняется отсутствием принятых и валидированных критических порогов для церебрального индекса тканевой оксигенации [10, 18]. Это особенно актуально для новорожденных и детей раннего возраста, которым проводится хирургическая коррекция ВПС в условиях ИК.

Роль метода NIRS при механической поддержке кровообращения

В связи с негативными эффектами экстракорпоральных контуров, в том числе с их способностью потенцировать системный воспалительный ответ, было рассмотрено применение NIRS как метода церебропротекции при проведении экстракорпоральной поддержки кровообращения. Так, в исследовании I. Khan и соавт. показано, что степень снижения уровня церебральной оксигенации, измеренной методом NIRS, связано с развитием вторичных неврологических осложнений у детей, которым проводилась вено-артериальная экстракорпоральная мембранная оксигенация [19]. В другом ретроспективном исследовании на детях в возрасте до 18 лет, которые находились на вено-артериальной экстракорпоральной мембранной оксигенации с мониторингом церебральной оксиметрии методом NIRS, показано, что снижение уровня церебральной сатурации по данным NIRS связано с отрицательными краткосрочными исходами у детей всех возрастов, которым была проведена вено-артериальная экстракорпоральная мембранная оксигенация. Минимальным уровнем rScO₂ для предотвращения негативного воздействия механической перфузии на ткань головного мозга установлено значение в 80% [20]. Авторы заключили, что мониторинг NIRS может стать частью стратегии церебропротекции для оценки риска повреждения головного мозга, связанного с экстракорпоральной мембранной оксигенацией у детей, вместе с такими методами, как проведение гемотрансфузии и терапевтической гипотермии. В клинических исследованиях подтверждено, что динамические изменения в региональной церебральной кислородной сатурации (rSO₂) после остановки сердца и сердечно-легочной реанимации также играют роль в прогнозировании риска развития невроло-

гических осложнений после восстановления спонтанного кровообращения [21].

Хирургия у детей с ВПС и перспективы церебропротекции

Пациенты с ВПС, особенно новорожденные дети, представляют собой крайне уязвимую группу, у которой происходят значительные гемодинамические изменения во время операций на сердце в условиях ИК. С учетом несовершенной ауторегуляции детского организма интраоперационный контроль церебральной гемодинамики имеет крайне важное значение для профилактики церебрального повреждения как фактора риска послеоперационной когнитивной дисфункции и задержки нервно-психического развития ребенка. В проспективном исследовании с применением транскраниальной доплерографии и мониторинга NIRS при операциях на сердце у детей снижение церебральной оксигенации более чем на 20% от исходного уровня было связано с более высокой частотой послеоперационных неврологических осложнений [13, 22]. В проспективном исследовании J.J. Wong и соавт. описана когорта из 21 ребенка с цианотичными ВПС с измерением rSO₂ в течение периоперационного периода. В отличие от SpO₂, которая нормализовалась сразу после коррекции, уровень rSO₂ временно повысился во время и после проведения ИК и не увеличивался после хирургической коррекции ВПС вплоть до момента перевода пациента из отделения реанимации и интенсивной терапии [23].

Паллиативные операции часто проводятся детям при лечении тяжелых ВПС, таких как синдром гипоплазии левых отделов сердца, единый желудочек сердца, атрезия клапана легочной артерии. Наиболее распространены наложение системного легочного шунта и бандинг легочной артерии. При проведении этих процедур могут отмечаться значительные колебания церебральной перфузии в связи с изменениями соотношения легочного и системного кровотока и сатурации крови кислородом. В исследовании Y. Takeda и соавт. оценивалась церебральная перфузия методом транскраниальной доплеровской сонографии и церебральная оксиметрия методом NIRS во время описанных операций. В исследование были включены 22 ребенка с системным легочным шунтом и 20 детей, которым было проведено суживание легочной артерии. Не определено значимых различий в скорости мозгового кровотока между началом и концом операции в обоих случаях [24]. Церебральная оксигенация снизилась в обеих процедурах, а сатурация артериальной крови кислородом была практически одинаковой до и после обеих процедур с условием проведения адекватного перфузиологического обеспечения для достижения целевых параметров гемодинамики. В крупном

проспективном исследовании ($n = 112$) описаны разные исходные уровни rSO_2 при разных ВПС у детей (тетрада Фалло, легочная атрезия, единый желудочек сердца с аортопульмональным шунтом, двунаправленный кавопульмональный анастомоз и шунт Фонтена) [25]. В ходе этапной хирургической коррекции единого желудочка сердца уровень rSO_2 у пациентов составил 61–70% [26]. Предполагается, что на точность измерения исходного уровня rSO_2 у пациентов могут влиять проведенная интубация трахеи и старт ИВЛ, что может давать погрешность при попытке оценки разницы в показателях аппаратного мониторинга.

В исследовании Y. Yagi и соавт. на 30 пациентах детской популяции с ВПС (единый желудочек сердца, атрезия клапана легочной артерии и трикуспидального клапана, синдром гипоплазии левых отделов сердца и др.) изучена взаимосвязь показателей церебральной оксиметрии (rSO_2), полученных с помощью метода NIRS, с уровнями SpO_2 , гемоглобина и церебрального перфузионного давления при проведении операций Гленна и Фонтена. Показано, что SpO_2 определял уровень rSO_2 при обеих процедурах и что уровень SpO_2 значимо повышался только у пациентов после операции Фонтена [27]. В некоторых исследованиях также отмечается, что на показатели NIRS влияет повышение сердечного выброса как ответ пациента на инфузию, что показано в исследовании корреляции волемического статуса с уровнем церебральной оксигенации [28]. В исследовании G. Bertolizio и соавт., изучавших церебральную перфузию при проведении операций Глена, показано, что применение NIRS с целью церебропротекции у детей с единым желудочком сердца и шунт-зависимой циркуляцией было связано с улучшением церебральной оксигенации и отдаленных неврологических исходов [29].

В исследовании D. Altun и соавт. показана значимая корреляция между $ScvO_2$ крови из центральной вены и показателями NIRS. Установлено, что постоянный мониторинг церебральной перфузии с помощью метода трансдермальной NIRS может быть альтернативным методом мониторинга центральной венозной сатурации кислородом у детей при коррекции ВПС [30]. Своевременное распознавание снижения церебральной оксигенации способствует принятию клинических решений во время операции с ИК, в том числе в пользу профилактики церебрального повреждения. Хотя контроль венозной сатурации информативен для оценки адекватности системной доставки кислорода, инвазивный забор образцов крови для этого исследования представляет интермиттирующий результат, не позволяющий проводить онлайн-мониторинг адекватности перфузии. Спектроскопия в ближнем инфракрасном диапазоне позволяет неинвазивно и своевременно оценивать адекватность доставки и потребления

кислорода тканями [31]. В проспективном когортном исследовании M.O. Abubakar и соавт. описаны изменения церебральной оксигенации у новорожденных до и после операций на сердце в условиях ИК. Не найдено связи между степенью снижения вариабельности церебральной оксиметрии после операции и видом порока сердца (обструкция аорты, единый желудочек сердца и т. д.) или непосредственными исходами лечения пациента [32].

В исследовании NIRS во время вмешательств на дуге аорты в группе из 115 новорожденных авторами оценивалось влияние эффектов глубокого гипотермического циркуляторного ареста на показатели церебральной оксигенации. У новорожденных с обструкцией аорты отмечено снижение вариабельности церебральной оксиметрии, которое было не столь выраженным, как в случае с глубоким гипотермическим циркуляторным арестом [33]. Данные результаты могут быть обусловлены несколькими факторами, в том числе особенностями перфузиологического обеспечения операции. В исследовании M.C. Spaeder и соавт. [34] изучены 62 новорожденных младенца, которым проводились хирургическая коррекция или паллиативное вмешательство с использованием ИК. Средний возраст пациентов на момент операции составил восемь дней, тридцати шести пациентам была выполнена операция на едином желудочке сердца. Показано, что сниженная изменчивость индекса тканевой оксигенации при NIRS в раннем послеоперационном периоде после ИК при оперативной коррекции ВПС у новорожденных связана с отрицательными неврологическими исходами, даже с учетом эффектов таких операций, как коррекция единого желудочка сердца, аортального сужения или вмешательства в условиях глубокого гипотермического циркуляторного ареста.

Корреляция NIRS с маркерами нейронального повреждения в кардиохирургии

Известно, что с учетом метаболических потребностей ткани головного мозга весьма чувствительны к гипоперфузии и гипоксии. Изменения мозгового кровотока пропорциональны изменениям церебрального перфузионного давления. В исследовании Z. Hu и соавт., проведенном с участием кардиохирургических пациентов детского возраста, продемонстрировано, что уровень rSO_2 имеет положительную линейную корреляцию с церебральным перфузионным давлением [11, 35]. Эти результаты согласуются с выводами J. Menke и коллег, которые указали на то, что NIRS может стать инструментом для мониторинга и оптимизации параметров, влияющих на церебральную перфузию. Это исследование, однако, показало, что уровень rSO_2 обратно пропорционален температуре тела пациента, что может быть связано с различиями в фенотипах пациентов и видах проводимых вмешательств [2].

Кроме того, церебральное перфузионное давление, среднее АД во время ИК и уровень rSO_2 (а также изменения сатурации артериальной крови, артериовенозная разница в кислороде, коэффициент экстракции кислорода в тканях мозга и артериовенозная разница уровня лактата) продемонстрировали, что экстракция и потребление кислорода тканями мозга значимо уменьшаются при снижении температуры, что лежит в основе концепции защитной гипотермии головного мозга – известной методике церебропротекции в кардиохирургии [36].

В метаанализе, проведенном Y. Li и соавт., описана диагностическая значимость соотношений маркеров церебрального повреждения N-ацетиласпартата и холина, значимое снижение которого было отмечено у детей с ВПС, в то время как соотношение уровня лактата к уровню холина было повышено, что указывает на интраоперационные изменения метаболизма и перфузии тканей головного мозга у детей при коррекции ВПС, что также подчеркивает необходимость интраоперационного мониторинга церебральной перфузии [37]. В исследованиях способов защиты нейроваскулярной единицы также описываются такие лабораторные маркеры церебрального повреждения, как нейронспецифическая енолаза, окклюдин, белок S100B и GFAP [38–41].

У пациентов детского возраста доступна оценка конечно-тканевой перфузии органов с помощью NIRS или оптической когерентной томографии [42]. Достаточно изучено применение NIRS при интраоперационной оценке функции почек [43]. Например, в исследовании B. Ruf и соавт. оценивалась перфузия почек с помощью метода NIRS во время кардиохирургических операций у детей в условиях ИК. Показано, что баланс между доставкой и потреблением кислорода может служить ранним предиктором острого повреждения почек как следствия проведения ИК с его многочисленными органоповреждающими факторами (гемолиз, контакт крови с поверхностью экстракорпоральных контуров, гемодилюция и т. д.) [44]. Однако, учитывая сложность оценки конечно-тканевой оксигенации, маловероятно, что она будет использоваться как самостоятельный диагностический инструмент. Мониторинг почечной NIRS может быть включен в прогностические модели для раннего выявления риска острого повреждения почек у новорожденных и детей до года во время и после операции в условиях ИК.

В исследовании M. Modestini и соавт. при изучении 565 пациентов детского возраста, перенесших операции на сердце в условиях ИК, показано, что применение NIRS возможно после интубации трахеи с измерением уровня rSO_2 относительно исходного с целью стратификации пациентов с повышенным риском послеоперационных осложнений [45].

При описании методов лабораторной верификации церебральной дисфункции и повреждения нейроваскулярной единицы наиболее изученными являются следующие лабораторные маркеры: белок S100B, нейронспецифическая енолаза, окклюдин и глиальный фибриллярный кислый белок (GFAP). Например, в исследовании S. Abu-Sultaneh и соавт. показано применение NIRS в детской кардиохирургии, изученное относительно динамики белка S100B как маркера церебрального повреждения. В наших собственных исследованиях ограничения трансфузии как метода профилактики послеоперационной когнитивной дисфункции показана валидность применения данных маркеров [40, 46].

Показатели церебральной оксигенации и гемодинамики, полученные с помощью NIRS, являются практическими целями для вмешательства, и установление корреляции с уровнем сывороточных биомаркеров может быть перспективной стратегией профилактики церебрального повреждения. Неинвазивный мониторинг региональной тканевой оксигенации с помощью NIRS может предоставить такую важную информацию. В исследовании M. Redlin и соавт. церебральный индекс оксигенации тканей, измеренный с помощью NIRS, имел значительную корреляцию с SvO_2 , определенным одновременно в центральной вене. Это согласуется с предыдущими исследованиями, демонстрирующими значительные корреляции между оксигенацией в яремном синусе и церебральной оксигенацией, определенной с помощью транскраниального NIRS, у детей [47].

Сочетание церебральной и соматической оксиметрии в кардиохирургии

В проспективном исследовании L. Zhang и соавт. были изучены новорожденные и дети раннего возраста, которым проводилась хирургическая коррекция коарктации аорты в условиях ИК и селективной церебральной перфузией. Контроль оксигенации тканей головного мозга и периферических тканей ($SctO_2$ и $SstO_2$) выполнен с помощью размещения датчиков NIRS на лбу и в области поясницы соответственно. Значения $SctO_2$ и $SstO_2$ соотносились с величиной среднего АД и $PaCO_2$. В результате исследования отмечалось, что уровень $SstO_2$ был значительно ниже, чем $SctO_2$ до открытия аорты, и значительно выше, чем $SctO_2$ после открытия аорты [48]. Авторы пришли к выводу, что значения $SctO_2$ и $SstO_2$ имеют разные паттерны изменений до и после открытия аорты. Корреляции $SctO_2/SstO_2$ со средним АД и $PaCO_2$ при коррекции коарктации аорты у новорожденных и детей разного возраста компрометируются при проведении селективной церебральной перфузии и требуют дальнейшего изучения.

В исследовании I. Iliopoulos и соавт. сравнива-

лись аппараты для NIRS-мониторинга нескольких коммерческих производителей при интраоперационном ведении 36 детей с плановой катетеризацией отделов сердца на фоне общей анестезии для оценки корреляции данных методики NIRS с данными инвазивной оценки регионарной оксигенации и перфузии [1]. Показано, что данные регионарной оксиметрии, полученные методом NIRS, соотносятся с результатами инвазивного измерения сатурации кислородом венозной крови в сосудах почек и головного мозга, что позволяет использовать методику NIRS для определения тактики ведения пациента. Однако в связи с гетерогенностью детской популяции пациентов корреляция показателей мониторинга NIRS с инвазивной оксиметрией в сосудах почечного кровотока была хуже у пациентов с цианотическими ВПС по сравнению таковых у пациентов без цианоза [48–50].

В исследовании Т. Candan и соавт. показано, что оценка перфузии тканей играет ведущую роль при проведении ИК у детей с врожденной патологией сердца. Показано, что оценка церебральной и соматической оксигенации методом NIRS наиболее показательна у детей с цианотичными ВПС, а данные оксигенации, полученные методом церебральной NIRS, значимо коррелировали с уровнем среднего АД и лабораторным маркером гипоперфузии – лактатом [38].

Сравнение предиктивной способности NIRS с другими методами нейромониторинга

Среди разнообразных методов интраоперационного мониторинга состояния пациента потенциальными кандидатами для нейромониторинга с целью церебропротекции при проведении ИК во время кардиохирургических операций у детей являются такие неинвазивные методики, как NIRS, автоматическая пупиллометрия и доплеровская транскраниальная ультрасонография. Все эти технологии неинвазивны и хорошо воспроизводимы, что позволяет проводить групповые измерения и онлайн-мониторинг состояния церебральной перфузии. Однако дефицит клинических и экспериментальных данных каждой из указанных методик у детей с ВПС после хирургической коррекции в настоящее время является существенным ограничением для их широкого применения в педиатрической популяции пациентов в периоперационном периоде и при проведении интенсивной терапии [39].

Неврологические осложнения, такие как внутримозговые кровоизлияния и перивентрикулярная лейкомаляция, могут определять неблагоприятные неврологические исходы лечения у недоношенных детей. Цель лечения в таком случае должна состоять в минимизации риска их возникновения или в уменьшении объема повреждения. Обеспечение прикроватного нейромониторинга пациента по-

зволяет профилактировать возможные нарушения церебральной гемодинамики [40]. Применение NIRS позволит оценить региональную церебральную оксигенацию, которая в сочетании с другими неинвазивными методами может дать более полное представление о конечно-тканевой перфузии.

Применение метода NIRS для профилактики церебрального повреждения также нашло применение в лечении пациентов неврологического профиля. Описано применение метода в ряде клинических случаев острой окклюзии внутренней сонной артерии у пациентов с острым нарушением мозгового кровообращения [5, 32]. При проведении медикаментозного и хирургического лечения данные о церебральной перфузии, полученные с помощью метода NIRS, использовались для принятия клинических решений. NIRS регулярно применяют во время сердечно-сосудистых операций для выявления острых неврологических событий, и существуют исследования, показавшие, что применение NIRS может приводить к улучшению исходов лечения пациентов при сосудистых катастрофах при использовании метода NIRS для определения пределов ауторегуляции с целью поддержания оптимального среднего АД, в том числе с целью профилактики возникновения повторных неврологических осложнений, включая внутримозговые кровоизлияния [48]. М. Bruckner и соавт. было проведено рандомизированное клиническое исследование SafeBoosC по применению NIRS в сочетании с персонализированными схемами лечения в первые 72 ч жизни недоношенных новорожденных с экстремально низкой массой тела. Основным результатом было определение целевого диапазона 55–85% для церебральной оксигенации, и уровень церебральной гипоксии и гипероксии был значительно ниже у новорожденных, которым проводился NIRS-мониторинг, что улучшило исходы у исследуемых пациентов [28, 33].

В статистическом исследовании, проведенном М. Feldmann и соавт. по вопросу актуальности применения метода NIRS показано, что ближневолновая инфракрасная спектроскопия была наиболее распространенным методом оценки церебральной оксиметрии, используемым в 64, 80 и 72% случаев до, во время и после операции, в то время как при необходимости в нейровизуализации чаще всего применяется УЗИ головного мозга (транскраниальный доплер) – в 96 и 84% случаев до и после операции соответственно [17]. В отличие от других методов NIRS может обеспечить мониторинг organного кровотока или соотношения между доставкой и потребностью в кислороде, которые достаточно удобны для использования в самых разных клинических сценариях, но имеющаяся технология NIRS больше подходит для применения у новорожденных, младенцев и детей раннего возраста. Благо-

даря пониманию принципов и ограничений существующих и будущих устройств и их надлежащему применению, технологии, NIRS может сделать для мониторинга кровообращения то же, что пульсоксиметрия сделала для мониторинга дыхания: обеспечить непрерывную неинвазивную информацию, которая может значительно улучшить распознавание венозной десатурации, ишемии органов и гипоперфузии [34, 41].

Неинвазивная оценка церебральной оксигенации с помощью NIRS позволяет оценить регионарную перфузию ткани мозга как переменную соотношения доставки и потребления кислорода, что дает возможность использовать данную методику в разных клинических ситуациях для принятия решений в тактике интраоперационной защиты пациента. Необходимы дальнейшие исследования данного метода на отдельных когортах пациентов для развития мониторинга тканевой микроциркуляции, поскольку существующие методики применяются преимущественно в детской популяции.

Заключение

В будущем на роль применения методики ближневолновой инфракрасной спектроскопии может повлиять доступность аппаратов для мониторинга церебральной оксиметрии, которые можно использовать непрерывно в течение периоперационного ведения пациента и которые также будут включать возможность измерения церебральной перфузии и оценки пределов церебральной ауторегуляции. Более точное описание периопераци-

онных изменений церебральной гемодинамики и оксигенации у пациентов детского возраста с ВПС может определить наиболее правильную интерпретацию значений NIRS. Различные модальности перфузиологического обеспечения, особенно во время проведения гипотермического ИК, делают задачу анализа данных, полученных методом NIRS, еще более сложной. Роль применения трансдермальной соматической NIRS при хирургической коррекции ВПС также требует дальнейшего изучения. Корреляция известных маркеров церебрального повреждения при проведении ИК во время операций на сердце у детей с данными NIRS-мониторинга позволит разработать единую концепцию эффективной защиты головного мозга от повреждений для улучшения индивидуальных отдаленных исходов лечения и профилактики возможных неврологических осложнений.

Конфликт интересов

А.А. Михайлова заявляет об отсутствии конфликта интересов. А.А. Ивкин заявляет об отсутствии конфликта интересов. Е.В. Григорьев является заместителем главного редактора журнала «Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний».

Финансирование

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда No 22-15-00258, <https://rscf.ru/project/22-15-00258/>.

Информация об авторах

Михайлова Алена Александровна, младший научный сотрудник лаборатории органопroteкции у детей с врожденными пороками сердца отдела хирургии сердца и сосудов федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний», Кемерово, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0003-0246-3466

Ивкин Артём Александрович, кандидат медицинских наук заведующий лабораторией органопroteкции у детей с врожденными пороками сердца отдела хирургии сердца и сосудов, научный сотрудник лаборатории анестезиологии-реаниматологии и патофизиологии критических состояний, старший преподаватель научно-образовательного отдела, врач – анестезиолог-реаниматолог федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний», Кемерово, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0002-3899-1642

Григорьев Евгений Валерьевич, доктор медицинских наук, профессор РАН, заместитель директора по научной и лечебной работе, ведущий научный сотрудник лаборатории анестезиологии-реаниматологии и патофизиологии критических состояний федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний», Кемерово, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0001-8370-3083

Author Information Form

Mikhailova Alyona A., Junior Researcher at the Laboratory of Organoprotection in Children with Congenital Heart Defects, Department of Heart and Vascular Surgery, Federal State Budgetary Institution “Research Institute for Complex Issue of Cardiovascular Diseases”, Kemerovo, Russian Federation; **ORCID** 0000-0003-0246-3466

Ivkin Artem A., PhD, Head of the Laboratory of Organoprotection in Children with Congenital Heart Defects, Department of Heart and Vascular Surgery, Researcher at the Laboratory of Anesthesiology, Intensive Care and Pathophysiology of Critical Conditions, Senior Lecturer at the Department of Science and Education, Anesthesiologist, Intensive Care Physician at the Federal State Budgetary Institution “Research Institute for Complex Issue of Cardiovascular Diseases”, Kemerovo, Russian Federation; **ORCID** 0000-0002-3899-1642

Grigoriev Evgeny V., MD, PhD, Member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Research and Clinical Affairs, Leading Researcher at the Laboratory of Anesthesiology, Intensive Care and Pathophysiology of Critical Conditions, Federal State Budgetary Institution “Research Institute for Complex Issue of Cardiovascular Diseases”, Kemerovo, Russian Federation; **ORCID** 0000-0001-8370-3083

Вклад авторов в статью

ММА – получение, анализ и интерпретация данных исследования, написание статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

ИАА – вклад в концепцию и дизайн исследования, корректура статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

ГЕВ – вклад в концепцию и дизайн исследования, корректура статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

Author Contribution Statement

ММА – data collection, analysis and interpretation, manuscript writing, approval of the final version, fully responsible for the content

ИАА – contribution to the concept and design of the study, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

ГЕВ – contribution to the concept and design of the study, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Iliopoulos I., Cooper D.S., Reagor J.A., Koh W., Goldstein B.H., Khoury P.R., Morales D.L.S., Batlivala S. Absolute Versus Relative Near-Infrared Spectroscopy in Pediatric Cardiac Patients. *Pediatr Crit Care Med.* 2023;24(3):204-212. doi: 10.1097/PCC.0000000000003118.
- Menke J., Möller G. Cerebral near-infrared spectroscopy correlates to vital parameters during cardiopulmonary bypass surgery in children. *Pediatr Cardiol.* 2014;35(1):155-63. doi: 10.1007/s00246-013-0754-9.
- Brandoni D.A., Martínez Da Bove M.P., Moreno G.E. Use of near infrared spectroscopy for hemodynamic monitoring in pediatrics. *Arch Argent Pediatr.* 2022;120(2):129-135. English, Spanish. doi: 10.5546/aap.2022.eng.129.
- Yamamoto M., Toki T., Kubo Y., Hoshino K., Morimoto Y. Age Difference of the Relationship Between Cerebral Oxygen Saturation and Physiological Parameters in Pediatric Cardiac Surgery with Cardiopulmonary Bypass: Analysis Using the Random-Effects Model. *Pediatr Cardiol.* 2022;43(7):1606-1614. doi: 10.1007/s00246-022-02889-x.
- Holmgaard F., Vistisen S.T., Ravn H.B., Scheeren T.W.L. The response of a standardized fluid challenge during cardiac surgery on cerebral oxygen saturation measured with near-infrared spectroscopy. *J Clin Monit Comput.* 2020;34(2):245-251. doi: 10.1007/s10877-019-00324-w.
- Levy P.T., Pellicer A., Schwarz C.E., Neunhoffer F., Schuhmann M.U., Breindahl M., Fumagelli M., Mintzer J., de Boode W.; ESPR Special Interest Group "Near InfraRed Spectroscopy" (NIRS). Near-infrared spectroscopy for perioperative assessment and neonatal interventions. *Pediatr Res.* 2024;96(4):922-932. doi: 10.1038/s41390-021-01791-1.
- Yoshitani K., Kawaguchi M., Ishida K., Maekawa K., Miyawaki H., Tanaka S., Uchino H., Kakinohana M., Koide Y., Yokota M., Okamoto H., Nomura M. Guidelines for the use of cerebral oximetry by near-infrared spectroscopy in cardiovascular anesthesia: a report by the cerebrospinal Division of the Academic Committee of the Japanese Society of Cardiovascular Anesthesiologists (JSCVA). *J Anesth.* 2019;33(2):167-196. doi: 10.1007/s00540-019-02610-y.
- Qu J.Z., Kao L.W., Smith J.E., Kuo A., Xue A., Iyer M.H., Essandoh M.K., Dalia A.A. Brain Protection in Aortic Arch Surgery: An Evolving Field. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2021;35(4):1176-1188. doi: 10.1053/j.jvca.2020.11.035.
- Erdoes G., Rummel C., Basciani R.M., Verma R., Carrel T., Banz Y., Eberle B., Schroth G. Limitations of Current Near-Infrared Spectroscopy Configuration in Detecting Focal Cerebral Ischemia During Cardiac Surgery: An Observational Case-Series Study. *Artif Organs.* 2018;42(10):1001-1009. doi: 10.1111/aor.13150.
- Savluk O.F., Yilmaz A.A., Yavuz Y., Arisut S., Ukil Isildak F., Turkmen Karaagac A., Ozbek B., Cine N., Tuncer E., Ceyran H. Assessment of microcirculatory alteration by a vascular occlusion test using near-infrared spectroscopy in pediatric cardiac surgery: effect of cardiopulmonary bypass. *Expert Rev Med Devices.* 2024;21(3):249-255. doi: 10.1080/17434440.2024.2306155
- Hu Z., Xu L., Zhu Z., Seal R., McQuillan P.M. Effects of Hypothermic Cardiopulmonary Bypass on Internal Jugular Bulb Venous Oxygen Saturation, Cerebral Oxygen Saturation, and Bispectral Index in Pediatric Patients Undergoing Cardiac Surgery: A Prospective Study. *Medicine (Baltimore).* 2016;95(2):e2483. doi: 10.1097/MD.0000000000002483.
- Zaleski K.L., Kussman B.D. Near-Infrared Spectroscopy in Pediatric Congenital Heart Disease. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2020;34(2):489-500. doi: 10.1053/j.jvca.2019.08.048.
- Naguib A.N., Winch P.D., Sebastian R., Gomez D., Guzman L., Rice J., Tumin D., Galantowicz M., Tobias J.D. The Correlation of Two Cerebral Saturation Monitors With Jugular Bulb Oxygen Saturation in Children Undergoing Cardiopulmonary Bypass for Congenital Heart Surgery. *J Intensive Care Med.* 2017;32(10):603-608. doi: 10.1177/0885066616663649.
- Massey S.L., Weinerman B., Naim M.Y. Perioperative Neuromonitoring in Children with Congenital Heart Disease. *Neurocrit Care.* 2024;40(1):116-129. doi: 10.1007/s12028-023-01737-x.
- Ma Y., Zhao L., Wei J., Wang Z., Lui S., Song B., Gong Q., Wang P., Wu M. Comparing near-infrared spectroscopy-measured cerebral oxygen saturation and corresponding venous oxygen saturations in children with congenital heart disease: a systematic review and meta-analysis. *Transl Pediatr.* 2022;11(8):1374-1388. doi: 10.21037/tp-22-345.
- Klamt J.G., Vicente W.V.A., Garcia L.V., Carmona F., Abrão J., Menardi A.C., Manso P.H. Neuroprotective Anesthesia Regimen and Intensive Management for Pediatric Cardiac Surgery with Cardiopulmonary Bypass: a Review and Initial Experience. *Braz J Cardiovasc Surg.* 2017;32(6):523-529. doi: 10.21470/1678-9741-2016-0064.
- Feldmann M., Hagmann C., de Vries L., Disselhoff V., Pushparajah K., Logeswaran T., Jansen N.J.G., Breur J.M.P.J., Knirsch W., Benders M., Counsell S., Reich B., Latal B. Neuromonitoring, neuroimaging, and neurodevelopmental follow-up practices in neonatal congenital heart disease: a European survey. *Pediatr Res.* 2023;93(1):168-175. doi: 10.1038/s41390-022-02063-2.
- Ивкин А.А., Григорьев Е.В., Моргун А.В. Обоснование защиты нейроваскулярной единицы на клинической модели искусственного кровообращения. Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. 2022;11(4):177-183. doi:10.17802/2306-1278-2022-11-4-177-183
- Khan I., Rehan M., Parikh G., Zammit C., Badjatia N., Herr D., Kon Z., Hogue C., Mazzeffi M. Regional Cerebral Oximetry as an Indicator of Acute Brain Injury in Adults Undergoing Veno-Arterial Extracorporeal Membrane Oxygenation-A Prospective Pilot Study. *Front Neurol.* 2018;9:993. doi: 10.3389/fneur.2018.00993.
- Vedrenne-Cloquet M., Lévy R., Chareyre J., Kossorotoff M., Oualha M., Renolleau S., Grimaud M. Association of Cerebral Oxymetry with Short-Term Outcome in Critically ill Children Undergoing Extracorporeal Membrane Oxygenation. *Neurocrit Care.* 2021;35(2):409-417. doi: 10.1007/s12028-020-01179-9
- Takegawa R., Hayashida K., Yin T., Choudhary R.C., Miyara S.J., Khalili H., Shoaib M., Endo Y., Molmenti E.P., Becker L.B. Real-Time Brain Monitoring by Near-Infrared Spectroscopy Predicts Neurological Outcome after Cardiac Arrest and Resuscitation in Rats: A Proof of Concept Study of a Novel Prognostic Measure after Cardiac Arrest. *J Clin Med.* 2021;11(1):131. doi: 10.3390/jcm11010131.
- Thomas R., Shin S.S., Balu R. Applications of near-infrared spectroscopy in neurocritical care. *Neurophotonics.* 2023;10(2):023522. doi: 10.1117/1.NPh.10.2.023522.
- Wong J.J., Chen C.K., Moorakonda R.B., Wijeweera O., Tan T.Y.S., Nakao M., Allen J.C.Jr., Loh T.F., Lee J.H. Changes

in Near-Infrared Spectroscopy After Congenital Cyanotic Heart Surgery. *Front Pediatr.* 2018;6:97. doi: 10.3389/fped.2018.00097.

24. Takeda Y., Yamamoto M., Hoshino K., Ito Y.M., Kato N., Wakasa S., Morimoto Y. Changes in Cerebral Hemodynamics During Systemic Pulmonary Shunt and Pulmonary Artery Banding in Infants with Congenital Heart Disease. *Pediatr Cardiol.* 2023;44(3):695-701. doi: 10.1007/s00246-022-02999-6.

25. Ricci Z., Haiberger R., Tofani L., Romagnoli S., Favia I., Cogo P. Multisite Near Infrared Spectroscopy During Cardiopulmonary Bypass in Pediatric Patients. *Artif Organs.* 2015;39(7):584-90. doi: 10.1111/aor.12424.

26. Scott J.P., Hoffman G.M. Near-infrared spectroscopy: exposing the dark (venous) side of the circulation. *Paediatr Anaesth.* 2014;24(1):74-88. doi: 10.1111/pan.12301.

27. Yagi Y., Yamamoto M., Saito H., Mori T., Morimoto Y., Oyasu T., Tachibana T., Ito Y.M. Changes of Cerebral Oxygenation in Sequential Glenn and Fontan Procedures in the Same Children. *Pediatr Cardiol.* 2017;38(6):1215-1219. doi: 10.1007/s00246-017-1647-0.

28. Bruckner M., Pichler G., Urlesberger B. NIRS in the fetal to neonatal transition and immediate postnatal period. *Semin Fetal Neonatal Med.* 2020;25(2):101079. doi: 10.1016/j.siny.2020.101079.

29. Bertolizio G., DiNardo J.A., Laussen P.C., Polito A., Pigula F.A., Zurakowski D., Kussman BD. Evaluation of cerebral oxygenation and perfusion with conversion from an arterial-to-systemic shunt circulation to the bidirectional Glenn circulation in patients with univentricular cardiac abnormalities. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2015;29(1):95-100. doi: 10.1053/j.jvca.2014.06.001.

30. Altun D., Doğan A., Arnaz A., Yüksek A., Yalçınbaş Y.K., Türköz R., Sarioğlu T. Noninvasive monitoring of central venous oxygen saturation by jugular transcutaneous near-infrared spectroscopy in pediatric patients undergoing congenital cardiac surgery. *Turk J Med Sci.* 2020;50(5):1280-1287. doi: 10.3906/sag-1911-135.

31. Loomba R.S., Rausa J., Sheikholeslami D., Dyson A.E., Farias J.S., Villarreal E.G., Flores S., Bronicki R.A. Correlation of Near-Infrared Spectroscopy Oximetry and Corresponding Venous Oxygen Saturations in Children with Congenital Heart Disease. *Pediatr Cardiol.* 2022;43(1):197-206. doi: 10.1007/s00246-021-02718-7.

32. Abubakar M.O., Zanelli S.A., Spaeder M.C. Changes in Cerebral Regional Oxygen Saturation Variability in Neonates Undergoing Cardiac Surgery: A Prospective Cohort Study. *Pediatr Cardiol.* 2021;44(7):1560-1565. doi: 10.1007/s00246-023-03239-1.

33. Spaeder M.C., Surma V.J. Cerebral regional oxygen saturation variability in neonates following cardiac surgery. *Pediatr Res.* 2021;90(4):815-818. doi: 10.1038/s41390-020-01171-1.

34. Spaeder M.C., Klugman D., Skurow-Todd K., Glass P., Jonas R.A., Donofrio M.T. Perioperative Near-Infrared Spectroscopy Monitoring in Neonates With Congenital Heart Disease: Relationship of Cerebral Tissue Oxygenation Index Variability With Neurodevelopmental Outcome. *Pediatr Crit Care Med.* 2017;18(3):213-218. doi: 10.1097/PCC.0000000000001056.

35. Yamamoto M., Mori T., Toki T., Itosu Y., Kubo Y., Yokota I., Morimoto Y. The Relationships of Cerebral and Somatic Oxygen Saturation with Physiological Parameters in Pediatric Cardiac Surgery with Cardiopulmonary Bypass: Analysis Using the Random-Effects Model. *Pediatr Cardiol.* 2021;42(2):370-378. doi: 10.1007/s00246-020-02492-y.

36. Ивкин А.А., Григорьев Е.В., Цепочкина А.В., Шукевич Д.Л. Послеоперационный делирий у детей при коррекции врожденных септальных пороков сердца. *Вестник анестезиологии и реаниматологии.* 2021;18(2):62-68. doi:10.21292/2078-5658-2021-18-2-62-68

37. Li Y., Yin S., Fang J., Hua Y., Wang C., Mu D., Zhou K. Neurodevelopmental delay with critical congenital heart disease is mainly from prenatal injury not infant cardiac surgery:

current evidence based on a meta-analysis of functional magnetic resonance imaging. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2015;45(6):639-48. doi: 10.1002/uog.13436.

38. Candan T., Candan M., Yildiz C.E., Gumustas M., Erenturk S., Yalcinbas Y.K. Comparison of bilateral cerebral and somatic tissue oxygenation with near-infrared spectroscopy in cyanotic and acyanotic pediatric patients receiving cardiac surgery. *Arch Med Sci Atheroscler Dis.* 2020;29(5):e320-e331. doi: 10.5114/amsad.2020.103377.

39. Lovett M.E., MacDonald J.M., Mir M., Ghosh S., O'Brien N.F., LaRovere K.L. Noninvasive Neuromonitoring Modalities in Children Part I: Pupillometry, Near-Infrared Spectroscopy, and Transcranial Doppler Ultrasonography. *Neurocrit Care.* 2024;40(1):130-146. doi: 10.1007/s12028-023-01730-4.

40. Korček P., Straňák Z., Širc J., Naulaers G. The role of near-infrared spectroscopy monitoring in preterm infants. *J Perinatol.* 2017;37(10):1070-1077. doi: 10.1038/jp.2017.60.

41. Moses A.A., Zhigin V., Desir L., Sy H., Ellis J.A. Near-infrared spectroscopy in the diagnosis and management of acute internal carotid artery occlusion. *BMJ Case Rep.* 2024;17(9):e261413. doi: 10.1136/bcr-2024-261413.

42. Ивкин А.А., Григорьев Е.В., Хилажева Е.Д., Моргунов А.В. Влияние трансфузии и гипоксии на клетки модели нейроваскулярной единицы in vitro. *Общая реаниматология.* 2024;20(1):37-42. doi:10.15360/1813-9779-2024-1-2350

43. Joffe R., Al Aklabi M., Bhattacharya S., Cave D., Calleja T., Garros D., Majesic N., Ryerson L., Morgan C. Cardiac Surgery-Associated Kidney Injury in Children and Renal Oximetry. *Pediatr Crit Care Med.* 2018;19(9):839-845. doi: 10.1097/PCC.0000000000001656.

44. Ruf B., Bonelli V., Balling G., Hörer J., Nagdyman N., Braun S.L., Ewert P., Reiter K. Intraoperative renal near-infrared spectroscopy indicates developing acute kidney injury in infants undergoing cardiac surgery with cardiopulmonary bypass: a case-control study. *Crit Care.* 2015;19(1):27. doi: 10.1186/s13054-015-0760-9.

45. Modestini M., Hoffmann L., Niezen C., Armocida B., Vos J.J., Scheeren T.W.L. Cerebral oxygenation during pediatric congenital cardiac surgery and its association with outcome: a retrospective observational study. *Can J Anaesth.* 2020;67(9):1170-1181. doi: 10.1007/s12630-020-01733-1.

46. Abu-Sultaneh S., Hehir D.A., Murkowski K., Ghanayem N.S., Liedel J., Hoffmann R.G., Cao Y., Mitchell M.E., Jeromin A., Tweddell J.S., Hoffman G.M. Changes in cerebral oxygen saturation correlate with S100B in infants undergoing cardiac surgery with cardiopulmonary bypass. *Pediatr Crit Care Med.* 2014;15(3):219-28. doi: 10.1097/PCC.0000000000000055

47. Redlin M., Koster A., Huebler M., Boettcher W., Nagdyman N., Hetzer R., Kuppe H., Kuebler W.M. Regional differences in tissue oxygenation during cardiopulmonary bypass for correction of congenital heart disease in neonates and small infants: relevance of near-infrared spectroscopy. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2008;136(4):962-7. doi: 10.1016/j.jtcvs.2007.12.058.

48. Zhang L., Liu L., Zhong Z., Jin H., Jia J., Meng L., Mo X., Shi X. The effect of selective cerebral perfusion on cerebral versus somatic tissue oxygenation during aortic coarctation repair in neonates and infants. *BMC Anesthesiol.* 2021;21(1):284. doi: 10.1186/s12871-021-01498-0..

49. Ивкин А.А., Григорьев Е.В., Шукевич Д.Л. Диагностика когнитивной дисфункции у пациентов в отделениях реанимации и интенсивной терапии. *Вестник анестезиологии и реаниматологии.* 2018;15(3):47-55. doi:10.21292/2078-5658-2018-15-3-47-55.

50. Ивкин А. А., Григорьев Е. В., Балахнин Д. Г., Черных И. И. Интраоперационная трансфузия как фактор риска церебрального повреждения после кардиохирургических вмешательств у детей: проспективное наблюдательное исследование. *Вестник интенсивной терапии им. А. И. Салтанова.* 2023;1:101-114. doi: 10.21320/1818-474X-2023-1-101-114

REFERENCES

1. Iliopoulos I., Cooper D.S., Reagor J.A., Koh W., Goldstein B.H., Khoury P.R., Morales D.L.S., Batlivala S. Absolute Versus Relative Near-Infrared Spectroscopy in Pediatric Cardiac Patients. *Pediatr Crit Care Med.* 2023;24(3):204-212. doi: 10.1097/PCC.0000000000003118.

2. Menke J., Möller G. Cerebral near-infrared spectroscopy correlates to vital parameters during cardiopulmonary bypass surgery in children. *Pediatr Cardiol.* 2014;35(1):155-63. doi: 10.1007/s00246-013-0754-9.

3. Brandoni D.A., Martínez Da Bove M.P., Moreno G.E. Use

of near infrared spectroscopy for hemodynamic monitoring in pediatrics. *Arch Argent Pediatr.* 2022;120(2):129-135. English, Spanish. doi: 10.5546/aap.2022.eng.129.

4. Yamamoto M., Toki T., Kubo Y., Hoshino K., Morimoto Y. Age Difference of the Relationship Between Cerebral Oxygen Saturation and Physiological Parameters in Pediatric Cardiac Surgery with Cardiopulmonary Bypass: Analysis Using the Random-Effects Model. *Pediatr Cardiol.* 2022;43(7):1606-1614. doi: 10.1007/s00246-022-02889-x.

5. Holmgaard F., Vistisen S.T., Ravn H.B., Scheeren T.W.L. The response of a standardized fluid challenge during cardiac surgery on cerebral oxygen saturation measured with near-infrared spectroscopy. *J Clin Monit Comput.* 2020;34(2):245-251. doi: 10.1007/s10877-019-00324-w.

6. Levy P.T., Pellicer A., Schwarz C.E., Neunhoffer F., Schuhmann M.U., Breindahl M., Fumagelli M., Mintzer J., de Boode W.; ESPR Special Interest Group "Near InfraRed Spectroscopy" (NIRS). Near-infrared spectroscopy for perioperative assessment and neonatal interventions. *Pediatr Res.* 2024;96(4):922-932. doi: 10.1038/s41390-021-01791-1.

7. Yoshitani K., Kawaguchi M., Ishida K., Maekawa K., Miyawaki H., Tanaka S., Uchino H., Kakinohana M., Koide Y., Yokota M., Okamoto H., Nomura M. Guidelines for the use of cerebral oximetry by near-infrared spectroscopy in cardiovascular anesthesia: a report by the cerebrospinal Division of the Academic Committee of the Japanese Society of Cardiovascular Anesthesiologists (JSCVA). *J Anesth.* 2019;33(2):167-196. doi: 10.1007/s00540-019-02610-y.

8. Qu J.Z., Kao L.W., Smith J.E., Kuo A., Xue A., Iyer M.H., Essandoh M.K., Dalia A.A. Brain Protection in Aortic Arch Surgery: An Evolving Field. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2021;35(4):1176-1188. doi: 10.1053/j.jvca.2020.11.035.

9. Erdoes G., Rummel C., Basciani R.M., Verma R., Carrel T., Banz Y., Eberle B., Schroth G. Limitations of Current Near-Infrared Spectroscopy Configuration in Detecting Focal Cerebral Ischemia During Cardiac Surgery: An Observational Case-Series Study. *Artif Organs.* 2018;42(10):1001-1009. doi: 10.1111/aor.13150.

10. Savluk O.F., Yilmaz A.A., Yavuz Y., Arisut S., Ukil Isildak F., Turkmen Karaagac A., Ozbek B., Cine N., Tuncer E., Ceyran H. Assessment of microcirculatory alteration by a vascular occlusion test using near-infrared spectroscopy in pediatric cardiac surgery: effect of cardiopulmonary bypass. *Expert Rev Med Devices.* 2024;21(3):249-255. doi: 10.1080/17434440.2024.2306155

11. Hu Z., Xu L., Zhu Z., Seal R., McQuillan P.M. Effects of Hypothermic Cardiopulmonary Bypass on Internal Jugular Bulb Venous Oxygen Saturation, Cerebral Oxygen Saturation, and Bispectral Index in Pediatric Patients Undergoing Cardiac Surgery: A Prospective Study. *Medicine (Baltimore).* 2016;95(2):e2483. doi: 10.1097/MD.0000000000002483.

12. Zaleski K.L., Kussman B.D. Near-Infrared Spectroscopy in Pediatric Congenital Heart Disease. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2020;34(2):489-500. doi: 10.1053/j.jvca.2019.08.048.

13. Naguib A.N., Winch P.D., Sebastian R., Gomez D., Guzman L., Rice J., Tumin D., Galantowicz M., Tobias J.D. The Correlation of Two Cerebral Saturation Monitors With Jugular Bulb Oxygen Saturation in Children Undergoing Cardiopulmonary Bypass for Congenital Heart Surgery. *J Intensive Care Med.* 2017;32(10):603-608. doi: 10.1177/0885066616663649.

14. Massey S.L., Weinerman B., Naim M.Y. Perioperative Neuromonitoring in Children with Congenital Heart Disease. *Neurocrit Care.* 2024;40(1):116-129. doi: 10.1007/s12028-023-01737-x.

15. Ma Y., Zhao L., Wei J., Wang Z., Lui S., Song B., Gong Q., Wang P., Wu M. Comparing near-infrared spectroscopy-measured cerebral oxygen saturation and corresponding venous oxygen saturations in children with congenital heart disease: a systematic review and meta-analysis. *Transl Pediatr.* 2022;11(8):1374-1388. doi: 10.21037/tp-22-345.

16. Klamt J.G., Vicente W.V.A., Garcia L.V., Carmona F., Abrão J., Menardi A.C., Manso P.H. Neuroprotective Anesthesia Regimen and Intensive Management for Pediatric Cardiac Surgery with Cardiopulmonary Bypass: a Review and Initial Experience. *Braz J Cardiovasc Surg.* 2017;32(6):523-529. doi: 10.21470/1678-9741-2016-0064.

17. Feldmann M., Hagmann C., de Vries L., Disselhoff V.,

Pushparajah K., Logeswaran T., Jansen N.J.G., Breur J.M.P.J., Knirsch W., Benders M., Counsell S., Reich B., Latal B. Neuromonitoring, neuroimaging, and neurodevelopmental follow-up practices in neonatal congenital heart disease: a European survey. *Pediatr Res.* 2023;93(1):168-175. doi: 10.1038/s41390-022-02063-2.

18. Ivkin A.A., Grigoriev E.V., Morgun A.V. Substantiation of protection of a neurovascular unit in the clinical model of cardiopulmonary bypass. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases.* 2022;11(4):177-183. (In Russ.) <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2022-11-4-177-183>

19. Khan I., Rehan M., Parikh G., Zammit C., Badjatia N., Herr D., Kon Z., Hogue C., Mazzeffi M. Regional Cerebral Oximetry as an Indicator of Acute Brain Injury in Adults Undergoing Veno-Arterial Extracorporeal Membrane Oxygenation-A Prospective Pilot Study. *Front Neurol.* 2018;9:993. doi: 10.3389/fneur.2018.00993.

20. Vedrenne-Cloquet M., Lévy R., Chareyre J., Kossorotoff M., Oualha M., Renolleau S., Grimaud M. Association of Cerebral Oxymetry with Short-Term Outcome in Critically ill Children Undergoing Extracorporeal Membrane Oxygenation. *Neurocrit Care.* 2021;35(2):409-417. doi: 10.1007/s12028-020-01179-9

21. Takegawa R., Hayashida K., Yin T., Choudhary R.C., Miyara S.J., Khalili H., Shoaib M., Endo Y., Molmenti E.P., Becker L.B. Real-Time Brain Monitoring by Near-Infrared Spectroscopy Predicts Neurological Outcome after Cardiac Arrest and Resuscitation in Rats: A Proof of Concept Study of a Novel Prognostic Measure after Cardiac Arrest. *J Clin Med.* 2021;11(1):131. doi: 10.3390/jcm11010131.

22. Thomas R., Shin S.S., Balu R. Applications of near-infrared spectroscopy in neurocritical care. *Neurophotonics.* 2023;10(2):023522. doi: 10.1117/1.NPh.10.2.023522.

23. Wong J.J., Chen C.K., Moorakonda R.B., Wijeweera O., Tan T.Y.S., Nakao M., Allen J.C.Jr., Loh T.F., Lee J.H. Changes in Near-Infrared Spectroscopy After Congenital Cyanotic Heart Surgery. *Front Pediatr.* 2018;6:97. doi: 10.3389/fped.2018.00097.

24. Takeda Y., Yamamoto M., Hoshino K., Ito Y.M., Kato N., Wakasa S., Morimoto Y. Changes in Cerebral Hemodynamics During Systemic Pulmonary Shunt and Pulmonary Artery Banding in Infants with Congenital Heart Disease. *Pediatr Cardiol.* 2023;44(3):695-701. doi: 10.1007/s00246-022-02999-6.

25. Ricci Z., Haiberger R., Tofani L., Romagnoli S., Favia I., Cogo P. Multisite Near Infrared Spectroscopy During Cardiopulmonary Bypass in Pediatric Patients. *Artif Organs.* 2015;39(7):584-90. doi: 10.1111/aor.12424.

26. Scott J.P., Hoffman G.M. Near-infrared spectroscopy: exposing the dark (venous) side of the circulation. *Paediatr Anaesth.* 2014;24(1):74-88. doi: 10.1111/pan.12301.

27. Yagi Y., Yamamoto M., Saito H., Mori T., Morimoto Y., Oyasu T., Tachibana T., Ito Y.M. Changes of Cerebral Oxygenation in Sequential Glenn and Fontan Procedures in the Same Children. *Pediatr Cardiol.* 2017;38(6):1215-1219. doi: 10.1007/s00246-017-1647-0.

28. Bruckner M., Pichler G., Urlesberger B. NIRS in the fetal to neonatal transition and immediate postnatal period. *Semin Fetal Neonatal Med.* 2020;25(2):101079. doi: 10.1016/j.siny.2020.101079.

29. Bertolizio G., DiNardo J.A., Laussen P.C., Polito A., Pigula F.A., Zurakowski D., Kussman B.D. Evaluation of cerebral oxygenation and perfusion with conversion from an arterial-to-systemic shunt circulation to the bidirectional Glenn circulation in patients with univentricular cardiac abnormalities. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2015;29(1):95-100. doi: 10.1053/j.jvca.2014.06.001.

30. Altun D., Doğan A., Arnaz A., Yükses A., Yalçınbaş Y.K., Türköz R., Sarioğlu T. Noninvasive monitoring of central venous oxygen saturation by jugular transcutaneous near-infrared spectroscopy in pediatric patients undergoing congenital cardiac surgery. *Turk J Med Sci.* 2020;50(5):1280-1287. doi: 10.3906/sag-1911-135.

31. Loomba R.S., Rausa J., Sheikholeslami D., Dyson A.E., Farias J.S., Villarreal E.G., Flores S., Bronicki R.A. Correlation of Near-Infrared Spectroscopy Oximetry and Corresponding Venous Oxygen Saturations in Children with Congenital Heart Disease. *Pediatr Cardiol.* 2022;43(1):197-206. doi: 10.1007/s00246-021-02718-7.

32. Abubakar M.O., Zanelli S.A., Spaeder M.C. Changes in Cerebral Regional Oxygen Saturation Variability in Neonates

Undergoing Cardiac Surgery: A Prospective Cohort Study. *Pediatr Cardiol.* 2021;44(7):1560-1565. doi: 10.1007/s00246-023-03239-1.

33. Spaeder M.C., Surma V.J. Cerebral regional oxygen saturation variability in neonates following cardiac surgery. *Pediatr Res.* 2021;90(4):815-818. doi: 10.1038/s41390-020-01171-1.

34. Spaeder M.C., Klugman D., Skurrow-Todd K., Glass P., Jonas R.A., Donofrio M.T. Perioperative Near-Infrared Spectroscopy Monitoring in Neonates With Congenital Heart Disease: Relationship of Cerebral Tissue Oxygenation Index Variability With Neurodevelopmental Outcome. *Pediatr Crit Care Med.* 2017;18(3):213-218. doi: 10.1097/PCC.0000000000001056.

35. Yamamoto M., Mori T., Toki T., Itosu Y., Kubo Y., Yokota I., Morimoto Y. The Relationships of Cerebral and Somatic Oxygen Saturation with Physiological Parameters in Pediatric Cardiac Surgery with Cardiopulmonary Bypass: Analysis Using the Random-Effects Model. *Pediatr Cardiol.* 2021;42(2):370-378. doi: 10.1007/s00246-020-02492-y.

36. Ivkin A. A., Grigoriev E. V., Tsepokina A. V., Shukevich D. L. Postoperative delirium in children undergoing treatment of congenital septal heart defects. *Messenger of Anesthesiology and Resuscitation.* 2021;18(2): 62–68. doi: 10.21292/2078-5658-2021-18-2-62-68 (In Russian)

37. Li Y., Yin S., Fang J., Hua Y., Wang C., Mu D., Zhou K. Neurodevelopmental delay with critical congenital heart disease is mainly from prenatal injury not infant cardiac surgery: current evidence based on a meta-analysis of functional magnetic resonance imaging. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2015;45(6):639-48. doi: 10.1002/uog.13436.

38. Candan T., Candan M., Yildiz C.E., Gumustas M., Erenturk S., Yalcinbas Y.K. Comparison of bilateral cerebral and somatic tissue oxygenation with near-infrared spectroscopy in cyanotic and acyanotic pediatric patients receiving cardiac surgery. *Arch Med Sci Atheroscler Dis.* 2020; 29;5:e320-e331. doi: 10.5114/amsad.2020.103377.

39. Lovett M.E., MacDonald J.M., Mir M., Ghosh S., O'Brien N.F., LaRovere K.L. Noninvasive Neuromonitoring Modalities in Children Part I: Pupillometry, Near-Infrared Spectroscopy, and Transcranial Doppler Ultrasonography. *Neurocrit Care.* 2024;40(1):130-146. doi: 10.1007/s12028-023-01730-4.

40. Korček P., Straňák Z., Širc J., Naulaers G. The role of near-infrared spectroscopy monitoring in preterm infants. *J Perinatol.* 2017;37(10):1070-1077. doi: 10.1038/jp.2017.60.

41. Moses A.A., Zhigin V., Desir L., Sy H., Ellis J.A. Near-infrared spectroscopy in the diagnosis and management of acute internal carotid artery occlusion. *BMJ Case Rep.* 2024;17(9):e261413. doi: 10.1136/bcr-2024-261413.

42. Ivkin A. A., Grigoriev E. V., Khilazheva E. D., Morgun A. V. The effect of transfusion and hypoxia on cells in an in vitro model of the neurovascular unit. *General Reanimatology.* 2024;20(1):37-42. doi:10.15360/1813-9779-2024-1-2350 (In Russian)

43. Joffe R., Al Aklabi M., Bhattacharya S., Cave D., Calleja T., Garros D., Majesic N., Ryerson L., Morgan C. Cardiac Surgery-Associated Kidney Injury in Children and Renal Oximetry. *Pediatr Crit Care Med.* 2018;19(9):839-845. doi: 10.1097/PCC.0000000000001656.

44. Ruf B., Bonelli V., Balling G., Hörer J., Nagdyman N., Braun S.L., Ewert P., Reiter K. Intraoperative renal near-infrared spectroscopy indicates developing acute kidney injury in infants undergoing cardiac surgery with cardiopulmonary bypass: a case-control study. *Crit Care.* 2015;19(1):27. doi: 10.1186/s13054-015-0760-9.

45. Modestini M., Hoffmann L., Niezen C., Armocida B., Vos J.J., Scheeren T.W.L. Cerebral oxygenation during pediatric congenital cardiac surgery and its association with outcome: a retrospective observational study. *Can J Anaesth.* 2020;67(9):1170-1181. doi: 10.1007/s12630-020-01733-1.

46. Abu-Sultaneh S., Hehir D.A., Murkowski K., Ghanayem N.S., Liedel J., Hoffmann R.G., Cao Y., Mitchell M.E., Jeromin A., Tweddell J.S., Hoffman G.M. Changes in cerebral oxygen saturation correlate with S100B in infants undergoing cardiac surgery with cardiopulmonary bypass. *Pediatr Crit Care Med.* 2014;15(3):219-28. doi: 10.1097/PCC.0000000000000055

47. Redlin M., Koster A., Huebler M., Boettcher W., Nagdyman N., Hetzer R., Kuppe H., Kuebler W.M. Regional differences in tissue oxygenation during cardiopulmonary bypass for correction of congenital heart disease in neonates and small infants: relevance of near-infrared spectroscopy. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2008;136(4):962-7. doi: 10.1016/j.jtcvs.2007.12.058.

48. Zhang L., Liu L., Zhong Z., Jin H., Jia J., Meng L., Mo X., Shi X. The effect of selective cerebral perfusion on cerebral versus somatic tissue oxygenation during aortic coarctation repair in neonates and infants. *BMC Anesthesiol.* 2021;21(1):284. doi: 10.1186/s12871-021-01498-0..

49. Ivkin A. A., Grigoriev E. V., Shukevich D. L. Diagnostics of cognitive dysfunction in patients in the intensive care wards. *Messenger of Anesthesiology and Resuscitation.* 2018;15(3):47-55. doi:10.21292/2078-5658-2018-15-3-47-55. (In Russian)

50. Ivkin, A. A., Grigoryev, E. V., Balakhnin, D. G., Chermnykh, I. I. Intraoperative transfusion is a risk factor for cerebral injury after cardiac surgery in children: a prospective observational study // *Annals of Critical Care.* 2023;1:101–114. doi: 10.21320/1818-474X-2023-1-101-114. (In Russian)

Для цитирования: Михайлова А.А., Ивкин А.А., Григорьев Е.В. Диагностическая значимость метода ближней инфракрасной спектроскопии в профилактике церебрального повреждения при хирургической коррекции врожденных пороков сердца у детей. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний.* 2024;13(4S): 241-253. DOI: 10.17802/2306-1278-2024-13-4S-241-253

To cite: Mikhailova A.A., Ivkin A.A., Grigoriev E.V. Diagnostic significance of the near-infrared spectroscopy in the prevention of cerebral injury during surgical correction of congenital heart defects in children. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases.* 2024;13(4S): 241-253. DOI: 10.17802/2306-1278-2024-13-4S-241-253