

## Десятилетний опыт применения полнопоточной перфузии для защиты головного мозга и внутренних органов во время реконструктивных операций на дуге аорты у новорожденных

И.А. Велюханов<sup>1</sup>, Е.Н. Амансахатова<sup>1</sup>, И.В. Бондаренко<sup>1</sup>, О.С. Аникина<sup>1</sup>, Ю.Ю. Кулябин<sup>1</sup>, А.Н. Архипов<sup>1</sup>, А.В. Войтов<sup>1</sup>, В.Я. Мартыненко<sup>1</sup>, В.А. Непомнящих<sup>1</sup>, И.А. Корнилов<sup>2</sup>, И.А. Соинов<sup>1</sup>

**Для корреспонденции:** Екатерина Назаровна Амансахатова, e.amansakhatova@mail.ru

Поступила в редакцию 25 августа 2025 г. Исправлена 21 ноября 2025 г. Принята к печати 17 декабря 2025 г.

**Цитировать:** Велюханов И.А., Амансахатова Е.Н., Бондаренко И.В., Аникина О.С., Кулябин Ю.Ю., Архипов А.Н., Войтов А.В., Мартыненко В.Я., Непомнящих В.А., Корнилов И.А., Соинов И.А. Десятилетний опыт применения полнопоточной перфузии для защиты головного мозга и внутренних органов во время реконструктивных операций на дуге аорты у новорожденных. *Патология кровообращения и кардиохирургия*. 2026;30(1): 90-98. <https://doi.org/10.21688/1681-3472-2026-1-90-98>

### Информированное согласие

Получено информированное согласие официальных представителей пациентов на использование медицинских данных в научных целях.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства здравоохранения Российской Федерации (№ 124022500251-0).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Концепция и дизайн работы: И.А. Велюханов, И.В. Бондаренко, О.С. Аникина, А.Н. Архипов, И.А. Соинов  
Сбор и анализ данных: И.А. Велюханов, И.В. Бондаренко, О.С. Аникина  
Статистическая обработка данных: И.В. Бондаренко, Ю.Ю. Кулябин, В.Я. Мартыненко, В.А. Непомнящих  
Написание статьи: И.А. Велюханов, Е.Н. Амансахатова, А.В. Войтов, И.А. Соинов  
Исправление статьи: Е.Н. Амансахатова, О.С. Аникина, А.Н. Архипов, И.А. Корнилов, И.А. Соинов  
Утверждение окончательного варианта статьи: все авторы

### ORCID

И.А. Велюханов, <https://orcid.org/0000-0003-3742-8396>  
Е.Н. Амансахатова, <https://orcid.org/0009-0008-3193-4160>  
И.В. Бондаренко, <https://orcid.org/0009-0005-3141-9909>  
О.С. Аникина, <https://orcid.org/0009-0003-0077-5180>  
Ю.Ю. Кулябин, <https://orcid.org/0000-0002-2361-5847>  
А.Н. Архипов, <https://orcid.org/0000-0003-3234-5436>  
А.В. Войтов, <https://orcid.org/0000-0003-3797-4899>  
В.Я. Мартыненко, <https://orcid.org/0000-0001-6627-626X>  
В.А. Непомнящих, <https://orcid.org/0009-0008-6140-8663>  
И.А. Корнилов, <https://orcid.org/0000-0002-0599-6076>  
И.А. Соинов, <https://orcid.org/0000-0003-3691-2848>

© Велюханов И.А., Амансахатова Е.Н., Бондаренко И.В., Аникина О.С., Кулябин Ю.Ю., Архипов А.Н., Войтов А.В., Мартыненко В.Я., Непомнящих В.А., Корнилов И.А., Соинов И.А., 2026

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация  
<sup>2</sup> Медицинский центр Милтона С. Херши, Университетский медицинский колледж Пенсильванского государственного университета, г. Херши, штат Пенсильвания, США

### Аннотация

**Актуальность.** Полнопоточная перфузия представляет собой перспективную альтернативу таким традиционным методам, как глубокая гипотермическая остановка кровообращения, селективная перфузия головного мозга, поскольку позволяет обеспечить одновременную перфузию головного мозга и нижней половины тела, потенциально снижая риски как неврологических осложнений, так и острого повреждения почек. Однако опыт ее применения, особенно у наиболее уязвимой группы новорожденных, остается недостаточно изученным и требует анализа интраоперационных и отдаленных результатов.

**Цель.** Оценить интраоперационные и ранние послеоперационные результаты у новорожденных пациентов, перенесших реконструктивные операции на дуге аорты в условиях полнопоточной перфузии.

**Методы.** В представленном когортном проспективном исследовании выполнена оценка эффективности и безопасности хирургического лечения новорожденных пациентов после реконструктивных операций на дуге аорты с применением полнопоточной перфузии ( $n = 43$ ). Средний возраст пациентов составил 8 (5; 28) дней, а масса тела – 3,4 (2,9; 4) кг. Мужской пол преобладал в исследовании – 25 (58,2 %).

**Результаты.** Первичной конечной точкой было острое повреждение почек, оцененное по детской шкале KDIGO. Острое повреждение почек наблюдалось у 9 (21 %) пациентов. Единственным фактором острого повреждения был инотропный индекс в первый день ( $OR = 1,08$ ; 95 % ДИ (1,01; 1,17)). Неврологические осложнения наблюдались у 4 (9,3 %) пациентов. Госпитальная летальность составила 1 (2,3 %) случай.

**Заключение.** Полнопоточная перфузия при пластических операциях на дуге аорты у новорожденных пациентов является простой, эффективной и безопасной методикой органопroteкции с небольшой частотой острого повреждения почек.

**Ключевые слова:** врожденный порок сердца; коарктация аорты; неврологические осложнения; острое повреждение почек; полнопоточная перфузия



# Ten years of experience with total perfusion for cerebral and end-organ protection during aortic arch reconstruction in neonates

Ilya A. Velukhanov<sup>1</sup>, Ekaterina N. Amansakhatova<sup>1</sup>, Ilya V. Bondarenko<sup>1</sup>, Olga S. Anikina<sup>1</sup>, Yuriy Yu. Kulyabin<sup>1</sup>, Alexey N. Arkhipov<sup>1</sup>, Alexey V. Voitov<sup>1</sup>, Victor Y. Martynenkov<sup>1</sup>, Valery A. Nepomnyashchy<sup>1</sup>, Igor A. Kornilov<sup>2</sup>, Ilya A. Soynov<sup>1</sup>

**Corresponding author:** Ekaterina N. Amansakhatova, [e.amansakhatova@mail.ru](mailto:e.amansakhatova@mail.ru)

Received 25 August 2025. Revised 21 November 2025.  
Accepted 17 December 2025.

**How to cite:** Velukhanov I.A., Amansakhatova E.N., Bondarenko I.V., Anikina O.S., Kulyabin Yu.Yu., Arkhipov A.N., Voitov A.V., Martynenkov V.Y., Nepomnyashchy V.A., Kornilov I.A., Soynov I.A. Ten years of experience with total perfusion for cerebral and end-organ protection during aortic arch reconstruction in neonates. *Patologiya krovoobrashcheniya i kardiokirurgiya = Circulation Pathology and Cardiac Surgery*. 2026;30(1):90-98. (In Russ.) <https://doi.org/10.21688/1681-3472-2026-1-90-98>

## Informed consent

The patient's official representative has provided informed consent for the use of the recordings for medical purposes.

## Funding

The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Health of the Russian Federation (No. 124022500251-0).

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

## Contribution of the authors

Conception and study design: I.A. Velukhanov, I.V. Bondarenko, O.S. Anikina, A.N. Arkhipov, I.A. Soynov  
Data collection and analysis: I.A. Velukhanov, I.V. Bondarenko, O.S. Anikina  
Statistical analysis: I.V. Bondarenko, Yu.Yu. Kulyabin, V.Y. Martynenkov, V.A. Nepomnyashchy  
Drafting the article: I.A. Velukhanov, E.N. Amansakhatova, A.V. Voitov, I.A. Soynov  
Critical revision of the article: E.N. Amansakhatova, O.S. Anikina, A.N. Arkhipov, I.A. Kornilov, I.A. Soynov  
Final approval of the version to be published: all authors

## ORCID

I.A. Velukhanov, <https://orcid.org/0000-0003-3742-8396>  
E.N. Amansakhatova, <https://orcid.org/0009-0008-3193-4160>  
I.V. Bondarenko, <https://orcid.org/0009-0005-3141-9909>  
O.S. Anikina, <https://orcid.org/0009-0003-0077-5180>  
Yu.Yu. Kulyabin, <https://orcid.org/0000-0002-2361-5847>  
A.N. Arkhipov, <https://orcid.org/0000-0003-3234-5436>  
A.V. Voitov, <https://orcid.org/0000-0003-3797-4899>  
V.Y. Martynenkov, <https://orcid.org/0000-0001-6627-626X>  
V.A. Nepomnyashchy, <https://orcid.org/0009-0008-6140-8663>  
I.A. Kornilov, <https://orcid.org/0000-0002-0599-6076>  
I.A. Soynov, <https://orcid.org/0000-0003-3691-2848>

© 2026 Velukhanov et al.

<sup>1</sup> Meshalkin National Medical Research Center, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Milton S. Hershey Medical Center, Penn State University College of Medicine, Hershey, PA, USA

## Abstract

**Introduction.** Whole-body perfusion represents a promising alternative to traditional methods, such as deep hypothermic circulatory arrest and antegrade cerebral perfusion, potentially reducing the risks of both neurological complications and acute kidney injury. However, the experience with its application, especially in the most vulnerable group of neonates, remains insufficiently studied and requires systematic analysis of intraoperative and long-term outcomes.

**Objective.** To evaluate intraoperative and early postoperative outcomes in neonates undergoing aortic arch reconstruction with whole-body perfusion.

**Methods.** This prospective cohort study evaluated the efficacy and safety of surgical treatment in neonates undergoing aortic arch reconstruction with total perfusion ( $n = 43$ ). The median patient age was 8 (IQR 5–28) days, and median body weight was 3.4 (IQR 2.9–4) kg. Male patients predominated 25 (58.2 %).

**Results.** The primary endpoint was acute kidney injury assessed using the pediatric KDIGO criteria. Acute kidney injury was observed in 9 (21 %) of patients. The only significant factor for acute kidney injury was the inotropic index on postoperative day 1 (OR = 1.08; 95 % CI (1.01; 1.17)). Neurological complications occurred in 4 (9.3 %) of patients. Hospital mortality was 1 (2.3 %).

**Conclusion.** Whole-body perfusion represents a straightforward, efficacious, and safe organ protection strategy for neonatal aortic arch reconstruction, demonstrating a low rate of acute kidney injury.

**Keywords:** aortic coarctation; congenital heart defect; full-flow perfusion; neurological dysfunction; renal dysfunction



## Введение

Для достижения успешных результатов хирургической коррекции в объеме реконструкции дуги аорты у новорожденных требуется обеспечение «сухого» операционного поля, а также проведение адекватной нейро- и органопротекции [1; 2]. Долгое время для обеспечения органопротективного эффекта «золотым стандартом» при хирургическом лечении врожденной патологии дуги аорты являлась антеградная перфузия головного мозга (АПГМ) [3]. АПГМ снижает риск ишемического повреждения головного мозга за счет его постоянной перфузии, однако не обеспечивает перфузию нижних частей тела, что увеличивает риск развития острого повреждения почек [4]. В 2001 г. Imoto Y. и соавт. предложили новый метод перфузии, во время которого устанавливались канюля в безымянную артерию и дополнительная канюля в нисходящую аорту для обеспечения перфузии органов всего тела [5]. Несмотря на то, что данный метод зарекомендовал себя во многих кардиохирургических центрах, об эффективности полнопоточной перфузии, особенно у новорожденных и детей первого года жизни, написано мало.

Целью нашего исследования было оценить интраоперационные, а также ранние и отдаленные результаты у новорожденных пациентов, перенесших реконструктивные операции на дуге аорты в условиях полнопоточной перфузии.

## Методы

### Дизайн исследования и характеристики пациентов

В представленном исследовании выполнен проспективный анализ пациентов нашей клиники, проходивших лечение с июня 2018 г. по январь 2024 г. В исследование были включены 43 пациента с бивентрикулярной коррекцией врожденной обструктивной

патологии дуги аорты (коарктация с гипоплазией дуги аорты и перерыв дуги аорты). Дизайн-схема исследования представлена на рис. 1.

### Критерии включения в исследование:

- бивентрикулярная гемодинамика;
- обструкция системного кровотока на уровне дуги аорты (коарктация аорты, гипоплазия дуги аорты, перерыв дуги аорты);
- оперативное лечение в условиях искусственного кровообращения;
- дети первого года жизни.

### Критерии исключения из исследования:

- пациенты с тяжелым коморбидным фоном (неврологические осложнения, инфекционные осложнения, пациенты с острым повреждением почек, пациенты с некротическим энтероколитом), выявленные до оперативного лечения;
- пациенты, которым реконструкция дуги аорты выполнялась в условиях глубокой гипотермической остановки кровообращения (ГГОК);
- пациенты, которым реконструкция дуги аорты выполнялась в условиях антеградной перфузии головного мозга;
- недоношенные пациенты менее 32 недель гестации;
- пациенты с унивентрикулярной гемодинамикой;
- пациенты с аберрантной подключичной артерией.

### Конечные точки

**Первичная конечная точка:** острое повреждение почек по неонатальной шкале KDIGO.

**Вторичные точки:** 30-дневная летальность и любые неврологические осложнения (компьютерная томография (КТ) или магнитно-резонансная томография (МРТ) головного мозга выполнялись при появлении клинических симптомов), кровотечение.

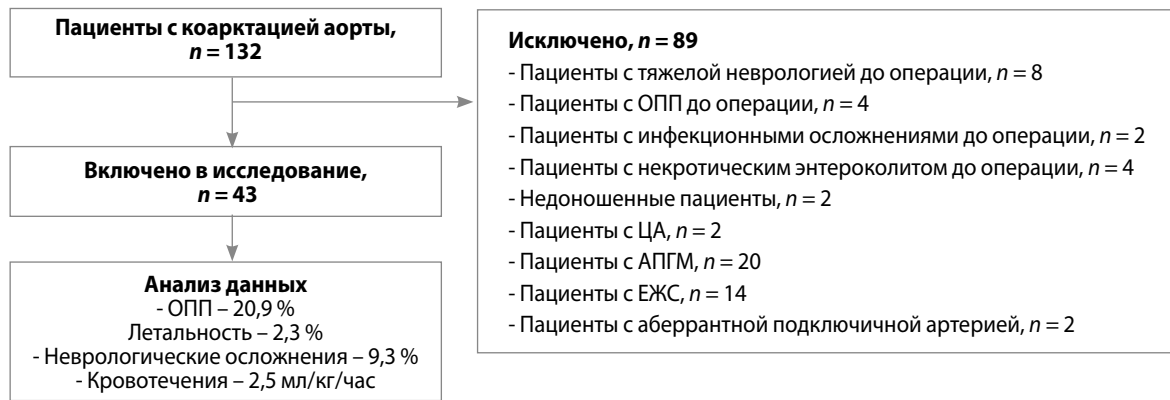


Рис. 1. Дизайн-схема исследования

Примечание. АПГМ – антеградная перфузия головного мозга; ЕЖС – единственный желудочек сердца; ОПП – острое повреждение почек; ЦА – циркуляторный арест.

## Методы исследования

Госпитальная летальность оценивалась при развитии летального исхода в течение 30 дней с момента выполнения хирургического лечения или до момента выписки пациента из стационара.

Острое повреждение почек оценивалось по критериям KDIGO с учетом динамики уровня креатинина сыворотки от исходного уровня и диуреза в течение первых 3 послеоперационных дней [6]. Показаниями к перитонеальному диализу были: 1) электролитные нарушения, такие как гиперкалиемия, не поддающиеся медикаментозному лечению; 2) перегрузка жидкостью и отеки; 3) стойкая олигурия; 4) стойкий метаболический ацидоз [7].

К критическим пациентам мы относили новорожденных с закрывшимся артериальным протоком и полиорганной дисфункцией, включая анурию и уровень лактата выше 6 ммоль/л при поступлении в наш центр [8].

Дозировка вазоактивных препаратов оценивалась с учетом максимального объема кардиотонической поддержки в течение первых 3 послеоперационных дней.

Вазоактивный инотропный индекс (VIS) рассчитывался по формуле Gaies M.G. и соавт. с дополнениями от Belletti A. и соавт. [9; 10]:

$$\begin{aligned} \text{VIS} = & \text{доза дофамина (мкг/кг/мин)} + \\ & + \text{доза добутамина (мкг/кг/мин)} + \\ & + 100 \times \text{доза адреналина (мкг/кг/мин)} + \\ & + 10 \times \text{доза милринона (мкг/кг/мин)} + \\ & + 10\,000 \times \text{доза вазопрессина (мкг/кг/мин)} + \\ & + 100 \times \text{доза норадреналина (мкг/кг/мин)} + \\ & + 10 \times \text{доза фенилэфрина (мкг/кг/мин)}. \end{aligned}$$

Неонатальный некротизирующий энтероколит оценивался по модифицированным критериям Bell [11].

Синдром полиорганной недостаточности определялся как острая дисфункция двух или более органов.

Неврологический статус обычно оценивался после операции, при подозрении на неврологические осложнения проводилась КТ или МРТ головного мозга. Для оценки церебральной перфузии и перфузии нижней половины тела во время операции и в первые сутки после операции использовалась ближняя инфракрасная спектроскопия (NIRS) (INVOS 5100, Somanetics, США). Датчики NIRS размещались на лбу и спине (на уровне L1–L3) для измерения насыщения тканей.

## Хирургическая техника и техника перфузии

Реконструкция дуги выполнялась четырьмя опытными кардиохирургами одной из хирургических техник: 1) «косой расширенный» анастомоз [12]; 2) анастомоз «конец в бок» [13]; 3) пластика дуги аорты за-

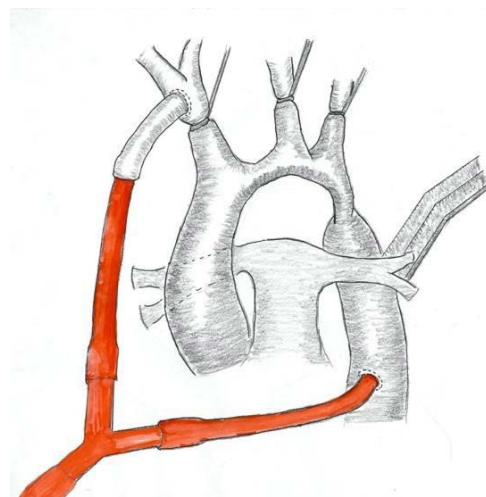


Рис. 2. Схема полнопоточной перфузии

платой из легочного аллографта (ООО «КАРДИОСТАР», Санкт-Петербург, Россия) [14]; 4) анастомоз по типу «восходящего скольжения» [15]. Температура тела контролировалась с помощью назофарингеального и ректального датчиков. Артериальное давление контролировалось с помощью артериальной линии в правой бедренной и правой лучевой артериях.

## Полнопоточная перфузия

Во время полнопоточной перфузии к участку безымянной артерии подшивался сосудистый протез из политетрафторэтилена (Carboflo®, Франция, BardInc., США) диаметром 4 мм. Через протез была введена артериальная канюля диаметром 6–8 Fr. После начала искусственного кровообращения сердце слегка приподнялось, через задний листок перикарда выделялась нисходящая аорта. Артериальной канюлей 6–8 Fr выполнялась канюляция нисходящей аорты. Мы поддерживали «теплый» температурный режим 30–32 °C с полнопоточной скоростью потока 150 мл/кг/мин, которая равномерно распределялась между двумя артериальными линиями (рис. 2).

## Статистический анализ

Проверка гипотезы о нормальности распределения признаков выполнялась с помощью критерия Шапиро – Уилка. Непрерывные данные представлены в виде медианы и межквартильного интервала (25-й; 75-й процентиля), категориальные – в виде чисел и процентов. Различия между группами сравнивались с использованием критерия Фишера для категориальных переменных и *U*-критерия Манна – Уитни для непрерывных переменных. Результат логистического регрессионного анализа выражен в виде отношения шансов с 95 % доверительным интервалом (95 % ДИ). Принятый уровень значимости

**Табл. 1.** Базовые и демографические характеристики пациентов,  $n = 43$

Характеристика	Значение
Рост, см	52 (50; 54)
Вес, кг	3,4 (2,9; 4)
Площадь поверхности тела, м <sup>2</sup>	0,22 (0,20; 0,24)
Пол (мужской), $n$ (%)	25 (58,2)
Возраст, дни	8 (5; 28)
Новорожденные пациенты, $n$ (%)	40 (93)
Пациенты массой менее 2500 г, $n$ (%)	3 (7)
Открытый артериальный проток, $n$ (%)	31 (72)
Диаметр артериального протока, мм	4,5 (4; 5)
Креатинин до операции, ммоль/л	61 (49; 74)
Критические пациенты, $n$ (%)	7 (16,3)
Септальные дефекты, $n$ (%)	33 (76,7)
PaO <sub>2</sub> , мм рт. ст.	101 (70; 132)
PaCO <sub>2</sub> , мм рт. ст.	42 (39; 47)
Сатурация (правая рука), %	92 (87; 97)
Лактат, ммоль/л	1,9 (1,2; 2,6)
Церебральная инфракрасная спектроскопия до операции, %	78 (51; 89)
Инфракрасная спектроскопия (спина) до операции, %	92 (82; 95)
Перерыв дуги аорты, $n$ (%)	7 (16,3)
Гипоплазия дуги аорты, $n$ (%)	36 (83,7)

*Примечание.* Данные представлены как медиана (25-й; 75-й процентиль; минимальный и максимальный показатели) или числовой показатель (%).

$p < 0,05$ . Анализ данных перфузионной защиты проводился с помощью программы Stata 14 (StataCorp LP, CollegeStation, США).

## Результаты

Базовые и демографические характеристики представлены в табл. 1.

Как видно по данным табл. 1, большинство пациентов были новорожденные дети с гипоплазией дуги аорты. Большая часть пациентов имела септальные дефекты. Большинство детей имели открытый артериальный проток. Медиана оксигенации головного мозга до операции по данным церебральной инфракрасной спектроскопии составила 78 (51; 89) %.

Интраоперационные и ранние послеоперационные результаты представлены в табл. 2. В интраоперационном периоде не было случаев, связанных с летальным исходом.

**Табл. 2.** Интраоперационные и ранние послеоперационные результаты,  $n = 43$

Характеристика	Значение
Температура, °C	32,0 (29; 34)
Время ИК, мин	86 (61; 105)
Время окклюзии Ao, мин	31 (25; 42)
Открытая грудная клетка, $n$ (%)	22 (51)
Время инотропной поддержки, дни	5 (3; 6)
Время ИВЛ, ч	89 (2; 5)
Вазоинотропный индекс 24 ч, мкг/кг/мин	7 (5; 15)
Вазоинотропный индекс 48 ч, мкг/кг/мин	6 (4,2; 10)
Вазоинотропный индекс 72 ч, мкг/кг/мин	4,5 (1,5; 8)
Креатинин 24 ч, ммоль/л	76 (69; 87)
Креатинин 48 ч, ммоль/л	72 (64; 87)
Креатинин 72 ч, ммоль/л	70 (60; 84)
Время нахождения в реанимации, дни	6,5 (5; 8)
Время госпитализации, дни	21 (18; 25)
Летальность, $n$ (%)	1 (2,3)
Острое повреждение почек rKDIGO, $n$ (%)	9 (21)
rKDIGO 1-я стадия, $n$ (%)	3 (7)
rKDIGO 2-я стадия, $n$ (%)	3 (7)
rKDIGO 3-я стадия, $n$ (%)	3 (7)
Заместительная почечная терапия, $n$ (%)	3 (7)
Энтероколит новорожденных, $n$ (%)	3 (7)
Сепсис, $n$ (%)	1 (2,3)
Инфракрасная спектроскопия (спина) во время операции, %	92 (90; 95)
Инфракрасная спектроскопия (голова) во время операции, %	90 (83; 93)
PaO <sub>2</sub> после операции, мм рт. ст.	200 (166; 208)
PaCO <sub>2</sub> после операции, мм рт. ст.	36 (30; 41)
Сатурация после операции (правая рука), %	99 (98; 100)
Лактат после операции, ммоль/л	5,2 (4,5; 6,9)
Кровотечение в 1-е сутки после операции, мл/кг/ч	2,5 (12,5; 27,6)
Неврологические осложнения, $n$ (%):	4 (9,3)
субдуральное кровоизлияние, $n$ (%)	4 (100)
внутрижелудочковое кровоизлияние, $n$ (%)	0 (0)
субарахноидальное кровоизлияние, $n$ (%)	0 (0)

*Примечание.* Ao – аорта; ИВЛ – искусственная вентиляция легких; ИК – искусственное кровообращение; rKDIGO – детская шкала KDIGO. Данные представлены как медиана (25-й; 75-й процентиль; минимальный и максимальный показатели) или числовой показатель (%).

Табл. 3. Факторы риска для острого повреждения почек по KDIGO

Показатель	Однофакторный анализ		Многофакторный анализ	
	ОР (95 % ДИ)	p	ОР (95 % ДИ)	p
Время инотропной поддержки, ч	1,1 [1,01; 1,19]	0,021	1,04 [0,98; 1,12]	0,104
Вазоинотропный индекс через 24 ч	1,04 [1,001; 1,12]	0,019	1,08 [1,01; 1,17]	0,025
Минимальная температура, °C	0,86 [0,77; 0,96]	0,011	0,91 [0,67; 1,14]	0,670

Как видно по данным табл. 2, острое повреждение почек присутствовало у 9 (21 %) пациентов, в 3 (7 %) случаях потребовалась заместительная почечная терапия. Неврологические осложнения имелись у 4 (9,3 %) пациентов, все пациенты имели субдуральное кровоизлияние. Летальность составила 1 (2,3 %) случай. Крайне редко в послеоперационном периоде у пациентов наблюдался сепсис – у 1 (2,3 %). У 3 (7 %) детей развивался энтероколит новорожденных.

Факторы риска для острого повреждения почек представлены в табл. 3.

Как видно по данным табл. 3, единственным фактором риска был вазоинотропный индекс, увеличение которого на 1 мкг/кг/мин увеличивало на 8 % риск острого повреждения почек.

### Обсуждение

Одной из основных задач во время реконструкции дуги аорты у детей раннего возраста является обеспечение не только бескровного операционного поля, но и оптимальной защиты внутренних органов [1]. С 1960 г. органопротективный эффект во время пластических операций на дуге аорты достигался с помощью ГГОК, поскольку она является простой и эффективной стратегией. За счет остановки кровообращения на безопасный период времени, обратно пропорциональный температуре тела (до 14,1–20,0 °C), замедляется метаболизм головного мозга на клеточном уровне, благодаря чему увеличивается толерантность головного мозга к гипоксии, что и обеспечивает нейропротективный эффект [16–18]. По данным ряда исследований McCullough J.N. и соавт. был определен безопасный период времени для проведения циркуляторного ареста при определенных температурах для выполнения коррекции порока. Так, целевое время остановки кровообращения при глубокой гипотермии (18–20 °C) в протоколах многих кардиохирургических центров составляет менее 30 мин [19].

Долгое время ГГОК оставалась стандартным методом, обеспечивающим органопротекцию во время хирургической коррекции коарктации аорты и гипоплазии дуги аорты у новорожденных и детей раннего возраста. Однако ряд исследований показывает

развитие неблагоприятных событий в раннем послеоперационном периоде, включая неврологические, респираторные и гематологические осложнения, нарушение кровообращения, повреждение почек и печени вследствие длительного проведения искусственного кровообращения в условиях глубокой гипотермии [17; 20]. Так, в работе Sinelnikov Yu.S. и соавт. 37,5 % новорожденных, оперированных в условиях глубокой гипотермии во время реконструкции дуги аорты, в послеоперационном периоде имели неврологические осложнения [20]. Кроме того, исследование Hughes G.C. и соавт. показало, что в раннем послеоперационном периоде после восстановления дуги аорты наблюдалось уменьшение объема серого вещества, толщины коры головного мозга, а также были нарушены связи между функциональными зонами, в результате чего формировалось развитие послеоперационной когнитивной дисфункции [16].

С целью усиления нейропротективного эффекта во время реконструкции дуги аорты Asou S.O. и его коллегами в 1996 г. была предложена новая стратегия – антеградная перфузия головного мозга (АПГМ), которая также проводилась в условиях глубокой гипотермии [1]. Однако противоречивые результаты ряда исследований [1; 20–22] способствовали проведению АПГМ в условиях умеренной гипотермии (25 °C), что привело не только к сокращению продолжительности искусственного кровообращения (ИК), но и к снижению частоты развития в раннем послеоперационном периоде осложнений, связанных с влиянием низких температур (синдром капиллярной утечки, гипокоагуляционный синдром, гемолиз) [1]. Снижение частоты неврологических осложнений по сравнению с ГГОК способствовало тому, что АПГМ в практике ведущих кардиохирургических центров стала стратегией выбора во время реконструкции дуги аорты у новорожденных [16]. На это также указывает работа Бодрова Д.А. и соавт., где использовались АПГМ и нормотермия [23]. Однако недостаточный коллатеральный кровоток не обеспечивает адекватную органопротекцию, при этом дополнительными факторами повреждения висцеральных органов являются действие низких температур (32 °C) и реперфузия во время согревания [4; 24].

Для предотвращения развития неврологических осложнений, а также поражения висцеральных органов возникала необходимость в разработке нового метода защиты головного мозга и внутренних органов. Так, в 2001 г. Imoto Y. и соавт. [5] была предложена полнопоточная перфузия с двойной аортальной канюляцией (ДАК) во время реконструкции дуги аорты. Дополнительная канюляция нисходящего отдела грудной аорты через задний листок перикарда или непосредственно в просвет пересеченной аорты способствовала одновременному достижению нейро- и органопротективного эффекта. По результатам ретроспективного исследования Hammel J.M. и соавт. видно превосходство полнопоточной перфузии (при охлаждении до 32 °С) над АПГМ в отношении сохранения оптимального висцерального кровотока [25; 26]. Интраоперационный период характеризовался меньшей продолжительностью ИК и окклюзии аорты. С учетом применения полнопоточной перфузии с ДАК и сокращения продолжительности ИК ранний послеоперационный период сопровождался лучшей почечной фильтрацией и низкой частотой развития острого повреждения почек, что подтверждает органопротективный эффект [4; 24].

Полнопоточная перфузия новорожденных во время реконструкции дуги аорты благодаря дополнительной висцеральной перфузии представляет собой более физиологичную перфузию органов, чем АПГМ. По данным исследования Kreuzer M. и соавт., показатели госпитальной смертности составили 2,3 % в группе с простой бивентрикулярной анатомией порока [27], что сопоставимо с нашим предыдущим и настоящим исследованиями [24]. В данных исследованиях госпитальная летальность не была связана со стратегией двойной артериальной канюляции. В нашем прошлом исследовании причиной летального исхода раннего послеоперационного периода был некротический энтероколит, связанный с длительной продолжительностью инфузии и большой дозой простагландина E1 в предоперационном периоде. В данном исследовании причиной летального исхода в госпитальном периоде был септический шок. У пациента во время внутриутробного развития была выявлена врожденная внутриутробная инфекция, которая стала причиной врожденной пневмонии. По экстренным показаниям ребенку было выполнено оперативное вмешательство, однако ранний послеоперационный период осложнился септическим шоком.

В исследовании Kılıç Y. и соавт. при сравнении двух стратегий перфузии во время реконструкции дуги аорты у детей раннего возраста было продемонстрировано преимущество полнопоточной перфузии над АПГМ,

поскольку группа с полнопоточной перфузией в меньшей степени требовала проведение перитонеального диализа в раннем послеоперационном периоде, чем группа с АПГМ [8]. Так, только 7 % детей из группы с полнопоточной перфузией нуждались в проведении перитонеального диализа, что сопоставимо с данными нашего исследования. Однако в исследовании Tan Reser B.Z. и соавт. не было выявлено преимущество полнопоточной перфузии над АПГМ в отношении почечной дисфункции, поскольку в данном исследовании показатели лактата, креатинина и мочевины были выше в группе с полнопоточной перфузией, чем в группе с АПГМ ( $p < 0,05$ ) [28].

В качестве оценки повреждения органов определяли уровень лактата. По данным исследования Kreuzer M. и соавт., стандартное значение лактата составляло менее 2 ммоль/л [27]. Однако в нашем исследовании показатели лактата крови превышали показатели исследования Kreuzer M. и соавт., после реконструкции дуги аорты и составляли 5,2 (4,5; 6,9) ммоль/л. Исследование Fernández-Doblas J. и соавт. продемонстрировало сопоставимые показатели лактата, которые через 72 ч имели тенденцию к снижению [29]. Мы можем предполагать, что повышенные показатели лактата могут быть связаны непосредственно с критической коарктацией, а также с продолжительным искусственным кровообращением во время радикальной коррекции.

Полнопоточная перфузия кроме защиты внутренних органов должна также обеспечивать нейропротективный эффект [30]. В качестве оценки нейропротективного эффекта после реконструкции дуги аорты мы проводили не только оценку клинических данных (судороги, парез конечностей), но и МРТ головного мозга на 5–7-е сутки после операции, поскольку возможно визуализировать бессимптомные очаги [31]. Однако, по данным ряда исследований, после проведения полнопоточной перфузии чаще определяют геморрагические очаги. Результаты многих исследований [1; 24] показали, что к основным причинам неврологических осложнений относятся использование стратегии a-stat, продолжительная перфузия головного мозга, высокие показатели парциального давления кислорода во время согревания пациента. Однако мы считаем, что одним из факторов риска неврологической дисфункции являются низкие температуры во время перфузии. По сравнению с предыдущим нашим исследованием на данный момент развитие неврологических осложнений снизилось вследствие повышения температуры во время перфузии.

Также в раннем послеоперационном периоде, несмотря на обеспечение висцеральной перфузии во

время пластики дуги аорты, у 3 (7 %) детей мы наблюдали развитие энтероколита, причиной которого была длительная инфузия простагландинов, доза которых составляла 5–10 нг/кг/мин, длительность – более 14 дней, для предотвращения закрытия открытого артериального протока и поддержания гемодинамики новорожденных в предоперационном периоде.

### Ограничение исследования

Малая когорта пациентов является одним из ограничивающих факторов нашего исследования. Мы не выполняли КТ- или МРТ-исследование до выполнения реконструктивных операций на дуге аорты, что могло

приводить к ложноположительным результатам по неврологическим осложнениям в послеоперационном периоде. Помимо этого, часть пациентов была исключена: пациенты с унивентрикулярной гемодинамикой и недоношенные пациенты, так как они более предрасположены к развитию острого повреждения почек.

### Заключение

Двойная артериальная канюляция во время реконструктивных операций на дуге аорты у новорожденных является эффективной и безопасной методикой органопротекции с низкой частотой острого повреждения почек и неврологических осложнений.

### Список литературы / References

1. Kulyabin Y.Y., Bogachev-Prokophiev A.V., Soynov I.A., Omelchenko A.Y., Zubritskiy A.V., Gorbatykh Y.N. Clinical Assessment of Perfusion Techniques During Surgical Repair of Coarctation of Aorta With Aortic Arch Hypoplasia in Neonates: A Pilot Prospective Randomized Study. *Semin Thorac Cardiovasc Surg.* 2020;32(4):860-871. PMID: 32446921. <https://doi.org/10.1053/j.semctvs.2020.04.015>
2. Cheng M., Xu H.Z., Zhang K.J., Peng X.L., Pan Z.X., Hu, Y. Risk Factors of Perioperative Brain Injury in Children Under Two Years Undergoing Coarctation Repair. *Pediatr Neurol.* 2023;141:109-117. PMID: 36812697. <https://doi.org/10.1016/j.pediatrneurol.2023.01.007>
3. Zajonz T.S., Edinger F., Beran R., Sturm N., Yoerueker U., Akintuerk H., Mueller M.F. Perioperative Incidence of Acute Renal Failure in Aortic Arch Reconstruction Using Retrograde Selective Lower Body Perfusion in Neonates and Infants. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2025;39(7):1738-1745. PMID: 40221235. <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2025.03.028>
4. Kornilov I.A., Sinelnikov Y.S., Soynov I.A., Ponomarev D.N., Kshanovskaya M.S., Krivoshepkina A.A., Gorbatykh A.V., Omelchenko A.Y. Outcomes after aortic arch reconstruction for infants: deep hypothermic circulatory arrest versus moderate hypothermia with selective antegrade cerebral perfusion. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2015;48(3): e45-50. PMID: 26141543. <https://doi.org/10.1093/ejcts/ezv235>
5. Imoto Y., Kado H., Shiokawa Y., Minami K., Yasui H. Experience with the Norwood procedure without circulatory arrest. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2001;122(5):879-82. PMID: 11689791. <https://doi.org/10.1067/mtc.2001.116948>
6. Сергеев С.А., Ломиворотов В.В. Острое повреждение почек у детей после кардиохирургических вмешательств. *Патология кровообращения и кардиохирургия.* 2021;25(4):11-22. <http://dx.doi.org/10.21688/1681-3472-2021-4-11-22>  
Sergeev S.A., Lomivorotov V.V. Acute kidney injury after cardiac surgery in children. *Patologiya krovoobrashcheniya i kardiokhirurgiya = Circulation Pathology and Cardiac Surgery.* 2021;25(4):11-22. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.21688/1681-3472-2021-4-11-22>
7. Soynov I.A., Gorbatykh Y.N., Kulyabin Y.Y., Manukian S.N., Rzaeva K.A., Velyukhanov I.A., Nichay N.R., Kornilov I.A., Arkhipov A.N. Evaluation of end-organ protection in newborns and infants after surgery of aortic arch hypoplasia: A prospective randomized study. *Perfusion.* 2025;40(4):1013-1022. PMID: 39177467. <https://doi.org/10.1177/02676591241276980>
8. Kılıç Y., Selçuk A., Korun O., Ceyda H., Çiçek M., Yurdakök O., Altın F., Erdem H., Aydemir N.A., Şaşmazel A. Comparison of cases with and without additional lower body perfusion in newborns undergoing aortic arch reconstruction with antegrade selective cerebral perfusion method. *Türk Gogus Kalp Damar Cerrahisi Derg.* 2022;30(2):192-198. PMID: 36168563; PMCID: PMC9473591. <https://doi.org/10.5606/tgkdc.dergisi.2022.22805>
9. Gaies M.G., Gurney J.G., Yen A.H., Napoli M.L., Gajarski R.J., Ohye R.G., Charpie J.R., Hirsch J.C. Vasoactive-inotropic score as a predictor of morbidity and mortality in infants after cardiopulmonary bypass. *Pediatr Crit Care Med.* 2010;11(2):234-8. PMID: 19794327. <https://doi.org/10.1097/PCC.0b013e3181b806fc>
10. Belletti A., Lerose C.C., Zangrillo A., Landoni G. Vasoactive-Inotropic Score: Evolution, Clinical Utility, and Pitfalls. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2021;35(10):3067-3077. PMID: 33069558. <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2020.09.117>
11. Patel R.M., Ferguson J., McElroy S.J., Khashu M., Caplan M.S. Defining necrotizing enterocolitis: current difficulties and future opportunities. *Pediatr Res.* 2020;88(Suppl 1):10-15. PMID: 32855506; PMCID: PMC8096612. <https://doi.org/10.1038/s41390-020-1074-4>
12. Soynov I.A., Rzaeva K.A., Gorbatykh Y.N., Kulyabin Y.Y., Gorbatykh A.V., Velyukhanov I.A., Nichay N.R., Manukian S.N., Magbulova S.A., Arkhipov A.N., Bogachev-Prokophiev A.V. Comparison of Sternotomy Access Versus Thoracotomy Access in the Surgical Treatment of Aortic Coarctation: A Propensity Score-matched Study. *J Saudi Heart Assoc.* 2024;36(3):305-315. PMID: 39497699; PMCID: PMC11534338. <https://doi.org/10.37616/2212-5043.1396>
13. Tulzer A., Mair R., Kreuzer M., Tulzer G. Outcome of aortic arch reconstruction in infants with coarctation: Importance of operative approach. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2016;152(6):1506-1513.e1. PMID: 27692955. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2016.08.029>
14. Сойнов И.А., Горбатов Ю.Н., Рзаева К.А., Кулябин Ю.Ю., Ничай Н.Р., Войтов А.В., Велюханов И.А., Архипов А.Н., Богачев-Прокофьев А.В., Чернявский А.М. Анализ результатов коррекции коарктации с гипоплазией дуги аорты: «ascending sliding» против пластики дуги аорты заплатой из легочного гомографта. *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины.* 2024;39(2):122-132. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2022-625>  
Soynov I.A., Gorbatykh Y.N., Rzaeva K.A., Kulyabin Y.Y., Nichay N.R., Voitov A.V., Velyukhanov I.A., Arkhipov A.N.,

- Bogachev-Prokophiev A.V., Chernyavsky A.M. Results of correction of coarctation with hypoplasia of the aortic arch: "ascending sliding" against plasty of the aortic arch with a patch from the pulmonary homograph. *Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*. 2024;39(2):122-132. (In Russ.) <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2022-625>
15. Gocof R., Hudziak D., Bis J., Mendrala K., Morkisz Ł., Podsiadło P., Kosiński S., Piątek J., Darocha T. The Role of Deep Hypothermia in Cardiac Surgery. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(13):7061. PMID: 34280995; PMCID: PMC8297075. <https://doi.org/10.3390/ijerph18137061>
16. Hughes G.C., Chen E.P., Browndyke J.N., Szeto W.Y., DiMaio J.M., Brinkman W.T., Gaca J.G., Blumenthal J.A., Karhausen J.A., Bisanar T., James M.L., Yanez D., Li Y.J., Mathew J.P. Cognitive Effects of Body Temperature During Hypothermic Circulatory Arrest Trial (GOT ICE): A Randomized Clinical Trial Comparing Outcomes After Aortic Arch Surgery. *Circulation*. 2024;149(9):658-668. PMID: 38084590; PMCID: PMC10922813. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.123.067022>
17. Alkhatip A.A.A.M.M., Kamel M.G., Farag E.M., Elayashy M., Farag A., Yassin H.M., Bahr M.H., Abdelhaq M., Sallam A., Kamal A.M., Emady M.F.E., Wagih M., Naguib A.A., Helmy M., Algameel H.Z., Abdelkader M., Mohamed H., Younis M., Purcell A., Elramely M., Hamza M.K. Deep Hypothermic Circulatory Arrest in the Pediatric Population Undergoing Cardiac Surgery With Electroencephalography Monitoring: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 2021;35(10):2875-2888. PMID: 33637420. <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2021.01.039>
18. McCullough J.N., Zhang N., Reich D.L., Juvonen T.S., Klein J.J., Spielvogel D., Ergin M.A., Griep R.B. Cerebral metabolic suppression during hypothermic circulatory arrest in humans. *Ann Thorac Surg*. 1999;67(6):1895-9; discussion 1919-21. PMID: 10391334. [https://doi.org/10.1016/s0003-4975\(99\)00441-5](https://doi.org/10.1016/s0003-4975(99)00441-5)
19. Rybar D. Deep Hypothermic Circulatory Arrest: A Brief History and Where It Is Going. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 2024;38(2):560-562. PMID: 38228425. <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2023.11.010>
20. Синельников Ю.С., Гасанов Э.Н., Соинов И.А., Мирзазаде Ф.А. Фатальные почечные и неврологические осложнения после реконструкции дуги аорты у новорожденных. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*. 2018;(6):77-82. <https://doi.org/10.17116/hirurgia2018677-82>
- Sinelnikov Yu.S., Gasanov E.N., Soynov I.A., Mirzazade F.A. Fatal renal and neurological complications after aortic arch repair in newborns. *Pirogov Russian Journal of Surgery*. 2018;(6):77-82. (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/hirurgia2018677-82>
21. Tian D.H., Weller J., Hasmat S., Preventza O., Forrest P., Kiat H., Yan T.D. Temperature Selection in Antegrade Cerebral Perfusion for Aortic Arch Surgery: A Meta-Analysis. *Ann Thorac Surg*. 2019;108(1):283-291. PMID: 30682350. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2018.12.029>
22. Anikina O.S., Soynov I.A., Kulyabin Yu.Yu., Amansakhatova E.N., Velyukhanov I.A., Arkhipov A.N., Ivanov S.M., Manukian S.N., Kornilov I.A. Cerebral and end-organ protection outcomes following the Norwood procedure: A retrospective cohort study. *Progress in Pediatric Cardiology*. 2026;80(1):101893. <https://doi.org/10.1016/j.pppedcard.2025.101893>
23. Бодров Д.А., Мишина М.О., Ким А.И., Казанцев К.Б., Свалов А.И., Тарасов Е.М. Селективная церебромиекардиальная нормотермическая перфузия при коррекции перерыва дуги аорты и коарктации аорты с тубулярной гипоплазией дуги у новорожденных. *Детские болезни сердца и сосудов*. 2021;4(18):281-287. <https://doi.org/10.24022/1810-0686-2021-18-4-281-287>
- Bodrov D.A., Mishina M.O., Kim A.I., Kazantsev K.B., Svalov A.I., Tarasov E.M. Selective normothermic cerebromyocardial perfusion for interrupted aortic arch and coarctation of aorta with tubular arch hypoplasia correction in newborn. *Children's Heart and Vascular Diseases*. 2021;18(4):281-287. (In Russ.) <https://doi.org/10.24022/1810-0686-2021-18-4-281-287>
24. Hammel J.M. Supplemental Perfusion Techniques for Aortic Arch Reconstruction, With Emphasis on Direct Cannulation of the Descending Aorta. *Semin Thorac Cardiovasc Surg Pediatr Card Surg Annu*. 2019;22:14-20. PMID: 31027558. <https://doi.org/10.1053/j.pcsu.2019.02.010>
25. Hammel J.M., Deptula J.J., Karamlou T., Wedemeyer E., Abdullahl I., Duncan K.F. Newborn aortic arch reconstruction with descending aortic cannulation improves postoperative renal function. *Ann Thorac Surg*. 2013;96(5):1721-6. PMID: 23998412. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2013.06.033>
26. Бойко А.М., Каменщиков Н.О., Мирошниченко А.Г., Подоксенов Ю.К., Свирко Ю.С., Луговский В.А., Дьякова М.Л., Кравченко И.В., Мухомедзянов А.В., Маслов Л.Н., Базарбекова Б.А., Петлин К.А., Панфилов Д.С., Козлов Б.Н. Оксид азота и митохондриальное повреждение в ткани почек при моделировании искусственного кровообращения и циркуляторного ареста: экспериментальное исследование. *Патология кровообращения и кардиохирургия*. 2024;28(1):41-49. <https://doi.org/10.21688/1681-3472-2024-1-41-49>
- Boyko A.M., Kamenshchikov N.O., Miroshnichenko A.G., Podoksenov Yu.K., Svirko Yu.S., Lugovskiy V.A., Diakova M.L., Kravchenko I.V., Mukhomedzyanov A.V., Maslov L.N., Bazarbekova B.A., Petlin K.A., Panfilov D.S., Kozlov B.N. Nitric oxide and mitochondria injuries in kidney tissue upon a simulation of cardiopulmonary bypass and circulatory arrest: an experimental study. *Patologiya krovoobrashcheniya i kardiokhirurgiya = Circulation Pathology and Cardiac Surgery*. 2024;28(1):41-49. (In Russ.) <https://doi.org/10.21688/1681-3472-2024-1-41-49>
27. Kreuzer M., Sames-Dolzer E., Schausberger L., Tulzer A., Ratschiller T., Haizinger B., Tulzer G., Mair R. Double-arterial cannulation: a strategy for whole body perfusion during aortic arch reconstruction. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*. 2018;27(5):742-748. PMID: 29722889. <https://doi.org/10.1093/icvts/ivy147>
28. Tan Recep B.Z., Tongut A., Hatemi A.C., Tuncer E., Yilmaz A.A., Ceyran H. Evaluation of postoperative renal functions and its effect on body perfusion in patients with double aortic cannulation. *Cardiol Young*. 2023;33(5):733-740. PMID: 35635193. <https://doi.org/10.1017/S1047951122001627>
29. Fernández-Doblas J., Ortega-Loubon C., Pérez-Andreu J., Linés M., Fernández-Molina M., Abella R.F. Selective visceral perfusion improves renal flow and hepatic function in neonatal aortic arch repair. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*. 2018;27(3):395-401. PMID: 29590367. <https://doi.org/10.1093/icvts/ivy091>
30. Соинов И.А., Горбатов Ю.Н., Кулябин Ю.Ю., Берген Т.А., Рзаева К.А., Велюханов И.А., Ничай Н.Р., Архипов А.Н. Оценка перфузиологической органопротекции у новорожденных и младенцев после хирургической коррекции гипоплазии дуги аорты. *Грудная и сердечно-сосудистая хирургия*. 2023;65(3):294-305. <https://doi.org/10.24022/0236-2791-2023-65-3-294-305>
- Soynov I.A., Gorbatiikh Yu.N., Kulyabin Yu.Yu., Bergen T.A., Rzaeva K.A., Velyukhanov I.A., Nichay N.R., Arkhipov A.N. Evaluation of perfusion organ protection in newborns and infants after surgical correction of aortic arch hypoplasia. *Russian Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2023;65(3):294-305. (In Russ.) <https://doi.org/10.24022/0236-2791-2023-65-3-294-305>
31. Kulyabin Y.Y., Gorbatiikh Y.N., Soynov I.A., Zubritskiy A.V., Voitov A.V., Bogachev-Prokophiev A.V. Selective Antegrade Cerebral Perfusion With or Without Additional Lower Body Perfusion During Aortic Arch Reconstruction in Infants. *World J Pediatr Congenit Heart Surg*. 2020;11(1):49-55. PMID: 31835988. <https://doi.org/10.1177/2150135119885887>