

Влияние внутриутробной гемодинамики на сегмент С дуги аорты у плода

Г.Г. Хубулава¹, С.П. Марченко¹, А.Б. Наумов¹, У.А. Струпенева², Е.С. Кулемин³,
О.В. Невмержицкая², О.Ю. Чупаева¹, А.А. Селиверстова³, А.В. Черномордова¹, М.С. Андреев¹,
Н.Г. Пилугов³, Е.С. Кавардакова¹

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия;

²СПб ГБУЗ «Родильный дом №18», Санкт-Петербург, Россия;

³ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И.П. Павлова» Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

Influence of intrauterine hemodynamics on the C segment of the aortic arch in the fetus

G.G. Hubulava¹, S.P. Marchenko¹, A.B. Naumov¹, U.A. Strupeneva², E.S. Kulemin³,
O.V. Nevmerzhitskaya², O.Yu. Chupaeva¹, A.A. Seliverstova³, A.V. Chernomordova¹, M.S. Andreev¹,
N.G. Pilyugov³, E.S. Kavardakova¹

¹Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia;

²Maternity hospital No. 18, Saint-Petersburg, Russia;

³Pavlov First Saint-Petersburg State Medical University, Saint-Petersburg, Russia

Цель. Оценка взаимосвязи между гемодинамическими характеристиками левого желудочка и геометрическими особенностями дуги аорты у плода.

Методы. Исследование выполнено у 31 плода в период с 29 по 34-ю неделю гестации методом эхокардиографии. Оценены морфогемодинамические характеристики левых отделов сердца и дуги аорты. Изученные параметры: конечный диастолический объем левого желудочка (КДОЛЖ), ударный объем левого желудочка (УОЛЖ), интеграл потока через аортальный клапан (VTI АК), диаметр кольца аортального клапана (АК), диаметр сегмента дуги аорты между брахиоцефальным стволом и левой сонной артерией (dC).

Результаты. Средний гестационный возраст составил 31,9±1,4 нед. (95% ДИ: 31,4–32,4 нед.). Средняя масса тела 1899±377 г (95% ДИ: 1762–2038 г). КДОЛЖ 1,57±0,64 мл (95% ДИ: 1,3–1,8). УОЛЖ 1,3±0,45 мл (95% ДИ: 1,1–1,4 мл). АК 0,4±0,07 см (95% ДИ: 0,39–0,44 см). Сегмент С дуги аорты 0,37±0,07 см (95% ДИ: 0,035–0,040 см). Между переменными, использованными для расчета dC дуги аорты, имеется прямая корреляция (коэффициент корреляции Пирсона: КДОЛЖ 0,51; $p=0,002$; УОЛЖ 0,46; $p=0,005$; АК 0,52; $p=0,001$). Диаметр сегмента С дуги аорты может быть рассчитан с помощью следующих уравнений: $dC = 0,76 \cdot \text{УОЛЖ} + 2,8$ (95% ДИ УОЛЖ 0,2–1,3 95% ДИ для константы 2,1–3,6; критерий Фишера 7,6 $p=0,01$). $dC = 0,59 \cdot \text{КДОЛЖ} + 2,8$ (95% ДИ КДОЛЖ 0,2–0,98; 95% ДИ для константы 2,2–3,5; критерий Фишера 10 $p=0,004$). $dC = 0,59 \cdot \text{АК} + 1,3$ (95% ДИ АК 0,22–0,95; 95% ДИ для константы –0,23–2,9; критерий Фишера 10,7; $p=0,003$).

Выводы. 1) Гемодинамические характеристики левого желудочка позволяют прогнозировать размеры дуги аорты у плодов с 29 по 34-ю неделю гестации; 2) морфогемодинамические характеристики дуги аорты определяются особенностями ударного объема левого желудочка, конечным диастолическим объемом левого желудочка и размером фиброзного кольца аортального клапана.

Ключевые слова: коарктация аорты, внутриутробная гемодинамика, конечный диастолический объем левого желудочка.

Для цитирования: Хубулава Г.Г., Марченко С.П., Наумов А.Б., Струпенева У.А., Кулемин Е.С., Невмержицкая О.В., Чупаева О.Ю., Селиверстова А.А., Черномордова А.В., Андреев М.С., Пилугов Н.Г., Кавардакова Е.С. Влияние внутриутробной гемодинамики на сегмент С дуги аорты у плода. Рос вестн перинатол и педиатр 2021; 66(4): 45–52. DOI: 10.21508/1027-4065-2021-66-4-45-52

Objective. To assess the correlation between the hemodynamic characteristics of the left ventricle and geometric features of the aortic arch in the fetus.

Methods. The study involved 31 fetuses from 29 to 34 weeks of gestation by echocardiography. The scientists assessed the morpho-hemodynamic characteristics of the left ventricle and aortic arch. They studied the following parameters: end-diastolic volume of the left ventricle (LVEDV), stroke volume of the left ventricle (LVSV), velocity-time integral of the flow through aortic valve (VTI AV), diameter of the aortic valve ring (AV), diameter of the aortic arch segment between brachiocephalic trunk and left carotid artery (dC). Results. The average gestational age was 31,9±1,4 weeks (95% CI: 31,4–32,4 weeks). Average body weight 1899±377 g (95% CI: 1762–2038 g). LVEDV = 1,57±0,64 ml (95% CI: 1,3–1,8). LVSV = 1,3±0,45 ml (95% CI: 1,1–1,4 ml). AV 0,4±0,07 cm (95% CI: 0,39–0,44 cm). C segment of the aortic arch is 0,37±0,07 cm (95% CI: 0,035–0,040 cm). There was direct correlation between the variables used to calculate dC (Pearson correlation coefficient: LVEDV = 0,51; $p=0,002$; LVSV = 0,46; $p=0,005$; AV = 0,52, $p=0,001$). The diameter of the C segment of the aortic arch can be calculated using the following equations: $dC = 0,76 \cdot \text{LVSV} + 2,8$ (95% CI LVSV 0,2–1,3 95% CI for constant 2,1–3,6; Fisher's criterion 7,6 $p=0,01$). $dC = 0,59 \cdot \text{LVEDV} + 2,8$ (95% CI LVEDV 0,2–0,98; 95% CI for constant 2,2–3,5; Fisher's criterion 10 $p=0,004$). $dC = 0,59 \cdot \text{AV} + 1,3$ (95% CI AV 0,22–0,95; 95% CI for constant –0,23–2,9; Fisher's criterion 10,7; $p=0,003$).

Conclusion. 1) hemodynamic characteristics of the left ventricle allow predicting the size of the aortic arch in fetuses from 29 to 34 weeks of gestation; 2) morpho-hemodynamic characteristics of the aortic arch are determined by the characteristics of the left ventricular stroke volume, end-diastolic volume of the left ventricle and the size of the fibrous ring of the aortic valve.

Key words: coarctation of the aorta, intrauterine hemodynamics, left ventricular end-diastolic volume.

For citation: Hubulava G.G., Marchenko S.P., Naumov A.B., Strupeneva U.A., Kulemin E.S., Nevmerzhitskaya O.V., Chupaeva O.Yu., Seliverstova A.A., Chernomordova A.V., Andreev M.S., Pilyugov N.G., Kavardakova E.S. Influence of intrauterine hemodynamics on the C segment of the aortic arch in the fetus. Ros Vestn Perinatol i Pediatr 2021; 66(4): 45–52 (in Russ). DOI: 10.21508/1027-4065-2021-66-4-45-52

Количество новорожденных, поступающих в кардиоцентры с пренатально установленным диагнозом коарктации аорты, составляет от 6 до 32% [1, 2]. Низкая частота пренатального выявления коарктации аорты может быть объяснена как сложностью патогенеза порока и отсроченностью клинических проявлений до момента закрытия открытого артериального протока, так и тем, что использование эхокардиографических критериев, отражающих размеры аортальной и дуктальной дуг, приводит к ложноотрицательным результатам [3, 4]. Отдельную проблему составляет диагностика на сроках до 20 нед гестации из-за недостаточной разрешающей спо-

собности современной аппаратуры. Современное оборудование для скринингового обследования плода позволяет определять объемно-геометрические характеристики камер сердца в узком коридоре, так как объемы камер сердца находятся ниже пределов разрешения. На сроках более 37 нед погрешности в диагностике связаны в большей мере с качеством изображения из-за особенностей расположения плода, помех от грудной клетки, при олигогидрамнионе и дугими причинами. Нередко диагноз после рождения оказывается более серьезным, чем предполагалось при пренатально выполненной эхокардиографии [5]. В ретроспективном исследовании постнатально диагностированных коарктаций аорты (пропущенных внутриутробно) показано, что только размер истмуса аорты и поперечной дуги позволяет установить диагноз пренатально [6].

Объемы желудочков коррелируют с массой и площадью поверхности тела плода и могут не соответствовать сроку гестации [5, 7]. Диспропорция левых и правых отделов сердца как самый распространенный скрининговый метод диагностики коарктации аорты позволяет выявить ее лишь у части плодов с риском развития этого порока. Диагностика коарктации аорты у плода даже по данным ведущих специалистов остается непростой задачей, так как в норме большая часть комбинированного сердечного выброса идет через открытый артериальный проток, а левый желудочек недогружен объемом из-за сниженного легочного венозного возврата [8–10].

К существенным ограничениям номограмм оценки объемно-геометрических характеристик левого желудочка у плода относится отсутствие «золотого стандарта», с которым можно было бы сравнить результаты, полученные даже самыми современными аппаратами эхокардиографии. Номограммы соотношения объемов правого/левого желудочков показывают значительную вариабельность от 1,1 до 1,5 [11, 12]. Количественное определение внутриутробной гемодинамики плода основывается на оценке параметра *Z* для аортального истмуса и открытого артериального протока [13–16]. Под параметром *Z* подразумевается статистическая величина оцениваемого параметра в виде стандартного отклонения от среднего его значения в популяции. Однако постпроцессинговая количественная оценка также вносит погрешности в получаемые результаты. Эти данные свидетельствуют о том, что прямая визуализация и применение *Z*-критерия в пренатальной диагностике обструкции на уровне дуги аорты не позволяют решить проблему своевременной диагностики патологии аорты.

Высокая частота ложноотрицательных результатов в выявлении патологии аорты, широкий разброс нормальных значений анатомических структур, неоднозначность интерпретации параметров *Z* убеждают в необходимости поиска новых методов диагности-

© Коллектив авторов, 2021

Адрес для корреспонденции: Хубулава Геннадий Григорьевич — академик РАН, д.м.н., проф., глав. кардиохирург Северо-Западного региона РФ, зав. кафедрой факультетской хирургии Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. академика И.П. Павлова, ORCID: 0000-0002-9242-9941

Марченко Сергей Павлович — д.м.н., науч. сотр. Научно-исследовательского центра сердечно-сосудистой хирургии Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. академика И.П. Павлова, ORCID: 0000-0003-4512-6101

Чупаева Ольга Юрьевна — врач-неонатолог клиники акушерства и гинекологии Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. академика И.П. Павлова, ORCID: 0000-0003-4204-6915

Черномордова Александра Владимировна — асс. кафедры функциональной диагностики Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. академика И.П. Павлова, ORCID: 0000-0002-2721-1014

Андреев Михаил Сергеевич — науч. сотр. научно-исследовательского центра сердечно-сосудистой хирургии Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. академика И.П. Павлова, ORCID: 0000-0002-4700-0265

e-mail: andreev.mikhail.s@gmail.com

Кавардакова Елена Сергеевна — к.м.н., детский кардиолог, науч. сотр. Научно-исследовательского центра сердечно-сосудистой хирургии Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. академика И.П. Павлова.

197022 Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6–8

Наумов Алексей Борисович — к.м.н., доц. кафедры анестезиологии-реаниматологии и неотложной педиатрии факультета послевузовского и дополнительного профессионального образования Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета, ORCID: 0000-0003-0323-0162

Кулемин Евгений Сергеевич — сердечно-сосудистый хирург, зав. операционным блоком перинатального центра Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета, ORCID: 0000-0001-9208-2290

Селиверстова Анастасия Алексеевна — врач-кардиолог, врач ультразвуковой диагностики отделения анестезиологии и реанимации для детей с кардиохирургической патологией клиники Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета, ORCID: 0000-0003-2992-2255

Пилогов Николай Геннадьевич — анестезиолог-реаниматолог отделения анестезиологии-реанимации для детей с кардиохирургической патологией Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета, ORCID: 0000-0002-5905-683X

194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2

Струпенева Ульяна Анатольевна — к.м.н., акушер-гинеколог Родильного дома №18

Невмержицкая Оксана Владимировна — к.м.н., зам. глав. врача по неонатологии Родильного дома №18,

ORCID: 0000-0002-3993-6899

193312, Санкт-Петербург, просп. Солидарности, д. 6

ческой оценки. В нашем исследовании реализован вариант диагностической интерпретации эхокардиографических данных, основанный на гипотезе о влиянии внутрисердечной гемодинамики плода на развитие морфогеометрических характеристик дуги аорты. Отсутствие в мировой литературе количественных данных о взаимосвязи гемодинамических параметров внутриутробной гемодинамики на формирование структур дуги аорты в норме определило цель нашего исследования.

Цель исследования: оценка взаимосвязи между гемодинамическими характеристиками левого желудочка и геометрическими особенностями дуги аорты в норме у плода.

Материалы и методы

Проведено пилотное поперечное выборочное исследование на базе женской консультации Первого Санкт-Петербургского Государственного Медицинского Университета в Санкт-Петербурге. В исследование включена 31 беременная в возрасте от 21 до 39 лет.

Критерии включения в исследование:

- согласие на участие в исследовании,
- отсутствие предварительно выявленных патологий плода при предыдущих обследованиях,
- нормально протекающая беременность,
- гестационный возраст плода от 29 до 34 нед.

Критериями исключения в исследования были:

- выявление структурной патологии сердца и его структур во время исследования,
- многоплодная беременность,
- сахарный диабет у матери,
- отказ от участия в исследовании.

Все исследования выполнены в женской консультации одним опытным специалистом по эхокардиографии плода. Эхокардиографическое исследование выполнялось на ультразвуковом аппарате Voluson E8 фирмы «General Electric». Оценивались параметры сердечно-сосудистой системы у плода, к которым относились размер дуги аорты, конечный диастолический размер левого желудочка, ударный объем левого желудочка и размер фиброзного кольца аортального клапана. Диаметр участка аорты между отхождением брахиоцефального ствола и левой общей сонной артерии (сегмент С, или поперечная дуга аорты) был выбран в качестве интегрального показателя оценки размеров дуги аорты.

Конечный диастолический размер левого желудочка фиксировали в парастеральной позиции по длинной оси (рис. 1). Ударный объем левого желудочка изучали в 5-камерной позиции (рис. 2). Размер фиброзного кольца аортального клапана оценивали в 5-камерной позиции путем измерения расстояния на уровне створок аортального клапана (рис. 3) [17].

Оценку ударного объема левого желудочка проводили в два этапа: на первом этапе определяли площадь

поперечного сечения аортального клапана, измеренную планиметрическим методом по короткой оси аортального клапана в момент раскрытия створок. Если четко визуализировать короткую ось в момент раскрытия створок не представлялось возможным, площадь рассчитывали на основе размера диаметра базального кольца клапана аорты по формуле: $CSA = 0,785 \cdot D^2$ (где CSA – площадь сечения, cm^2 , D – диаметр кольца клапана аорты, см); вторым этапом определяли интегральную скорость потока на уровне аортального клапана пульсовым доплером. Ударный объем рассчитывали по формуле: $SV = CSA \cdot VTI$ (где VTI – интегральная скорость потока, см).

Статистический анализ исследования проводили с помощью программного обеспечения IBM SPSS 22.0 для Windows. Предварительно рассчитаны среднее арифметическое значение и стандартное отклонение для каждой переменной. При оценке стандартизированных остатков с помощью построения гистограммы и квантильной диаграммы подтверждено нормальное распределение последних, что является условием для проведения линейного регрессионного анализа. Результаты выполненных измерений в тексте и таблицах представлены в виде $M \pm \sigma$ или медианы с указанием 95% доверительного интервала – Me (95% ДИ).

Для определения силы и направления взаимосвязи между гемодинамическими характеристиками левого желудочка и размерами дуги аорты, а также с целью прогнозирования значений дуги аорты проведен однофакторный линейный регрессионный анализ. В целях оценки связи между переменными определен коэффициент корреляции Пирсона. Критический уровень значимости (p) принимали равным 0,05. На основе построения скаттерограммы с регрессионной прямой определяли наличие линейной зависимости между независимой и зависимой переменной. С целью оценки общей вариации для каждой взаимосвязи между независимой и зависимой переменной определен коэффициент детерминации (R^2).

Проверку соблюдения условий независимости переменных осуществляли с помощью критерия Durbin–Watson. Статистическую значимость построенной регрессионной модели проверяли с помощью критерия Фишера (F). При построении регрессионной модели рассчитывали значения константны и коэффициента регрессии со значениями стандартной ошибки, и уровня значимости при 95% ДИ.

Данное исследование проводилось в строгом соответствии с требованиями Хельсинкской декларации (WMA, 1964) и Декларации о политике в области обеспечения прав пациентов в Европе (WHO/EURO, 1994).

Результаты

На основании критериев включения и исключения у 31 беременной выполнена расширенная эхокардиография плода. Средний гестационный возраст

обследованных плодов составил $31,9 \pm 1,4$ нед. Средняя масса 1899 ± 377 г. Основные полученные в ходе обследования параметры представлены в табл. 1.

Средний конечный диастолический объем левого желудочка составил $1,57 \pm 0,64$ мл. При оценке взаимосвязи показателей зависимой (размер дуги аорты в сегменте С) и независимой переменной (конечный диастолический размер левого желудочка) рассчитан коэффициент корреляции Пирсона ($r=0,507$; $p<0,02$), что соответствует наличию прямой корреляции между переменными средней степени силы. Коэффициент детерминации составил 0,257. Независимость наблюдений выявлена на основании значения критерия Durbin–Watson (1,332). Критерий Фишера ($F=10,049$; $p<0,04$) подтверждает статистическую значимость построенной регрессионной модели. Результаты расчета константы и коэффициента (см. табл. 1; табл. 2) позволяют сформировать уравнение линейной регрессии (размер дуги аорты в сегменте С = $0,59 \cdot$ конечный диастолический размер левого желудочка + 2,8).

Средний ударный объем левого желудочка составил 1,3 мл. Коэффициент корреляции Пирсона ($r=0,456$; $p<0,005$), что соответствует наличию прямой корреляции между переменными средней степени силы. Коэффициент детерминации составил 0,208. Значения критерия Durbin–Watson 1,44. Критерий Фишера $F = 7,63$ ($p<0,01$). Результаты расчета значений константы и коэффициента (см. табл. 1, 2) позволяют сформировать уравнение линейной регрессии

Таблица 1. Эхокардиографические параметры, полученные в ходе исследования

Table 1. Echocardiographic parameters obtained in the study

Показатель	Me	Мин	Макс	95% ДИ
КДО ЛЖ, мл	1,6	0,8	3,6	1,3—1,8
ФК АО, см	0,4	0,26	0,54	0,38—0,43
УО ЛЖ, мл	1,3	0,3	2,2	1,1—1,4
Сегмент С, мм	3,75	2,4	5,9	3,47—4,03

Примечание. КДО ЛЖ – конечный диастолический объем левого желудочка; ФК АО – диаметр фиброзного кольца аортального клапана; УО ЛЖ – ударный объем левого желудочка; сегмент С – сегмент С дуги аорты.



Рис. 1. Измерение диаметра фиброзного кольца аортального клапана.

Fig. 1. Measurement of aortic annulus.



Рис. 2. Измерение конечного диастолического объема левого желудочка.

Fig. 2. Measurement of left ventricular end-diastolic volume.



Рис. 3. Измерение интеграла скорости потока в выносящем тракте левого желудочка.

Fig. 3. Measurement of velocity time integral in left ventricular outflow tract.

Таблица 2. Коэффициенты регрессии для показателей сравнения

Table 2. Regression coefficients

Показатель сравнения	b	Стандартная ошибка	Значимость	Нижняя граница	Верхняя граница
КДО ЛЖ	$b_0 = 2,818$	0,319	<0,001	2,166	3,470
	$b_1 = 5,996$	1,188	0,004	0,211	0,980
УО ЛЖ	$b_0 = 2,807$	0,364	<0,001	2,062	3,553
	$b_1 = 0,755$	0,273	0,01	0,196	1,354
Аортальный клапан	$b_0 = 1,315$	0,756	0,092	-0,231	2,861
	$b_1 = 5,9$	1,805	0,003	2,208	9,591

Примечание. КДО ЛЖ – конечный диастолический объем левого желудочка; ФК АО – диаметр фиброзного кольца аортального клапана; УО ЛЖ – ударный объем левого желудочка; b – регрессионный коэффициент b .

(размер дуги аорты в сегменте С = $0,76 \cdot$ значение ударного объема левого желудочка + 2,8).

Средний диаметр фиброзного кольца аортального клапана составлял 0,4 см. Коэффициент корреляции Пирсона ($r=0,519$; $p<0,001$), что соответствует наличию прямой корреляции между переменными средней степени силы. Коэффициент детерминации составил 0,269. Значение критерия Durbin–Watson 1,6854; критерий Фишера $F = 10,685$ ($p<0,003$). Результаты расчета константы и коэффициента (см. табл. 1) позволяют сформировать уравнение линейной регрессии (размер дуги аорты в сегменте С = $0,59 \cdot$ диаметр фиброзного кольца аортального клапана + 1,3). Так, для КДО ЛЖ уравнение имеет вид $dC=0,59 \cdot \text{КДОЛЖ}+2,8$; для ФК АО $dC=0,59 \cdot \text{АК}+1,3$; для УО ЛЖ $dC=0,76 \cdot \text{УОЛЖ}+2,8$.

Обсуждение

Проведенное исследование позволило вычислить регрессионные уравнения, с помощью кото-

рого можно спрогнозировать рост сегмента С дуги аорты в норме у плодов гестационного возраста с 29 по 34-ю неделю на основании хорошо визуализируемых внутриутробно объемно-гемодинамических характеристик левого желудочка и фиброзного кольца аортального клапана. При оценке влияния гемодинамических характеристик левого желудочка на геометрические особенности дуги аорты в норме у плодов установлена корреляция средней силы. Полученные результаты статистического анализа позволили построить уравнения линейной регрессии, отражающие зависимость между размером дуги аорты в сегменте С и размерами фиброзного кольца аортального клапана, конечного диастолического размера левого желудочка и ударного объема левого желудочка. На основании полученных данных можно оценить сегмент С дуги аорты в норме и использовать полученные нормальные значения для прогнозирования нарушения системной перфузии у новорож-

денных вследствие гипоплазии дуги аорты в период гемодинамической перестройки кровообращения, при наличии отклонений от нормы.

Формирование анатомических структур дуги аорты и ее размер зависят от морфологических (до 56 сут гестации) и гемодинамических факторов (начиная с 56 сут гестации до рождения). Системный поток крови у плода формируется комбинированным сердечным выбросом левого и правого желудочков.

Первое определение гипоплазии дуги аорты опубликовано в работах A.J. Moulaert и соавт. в 1976 г. [18]. Диаметр проксимальной части дуги аорты у новорожденных должен быть более 60% от диаметра восходящей аорты, дистальная часть более 50% и истмус более 40%. T.R. Karl и соавт. [19] в своих исследованиях выявили формулу, согласно которой дуга считается гипоплазированной, если поперечный диаметр дуги в миллиметрах менее массы большого, выраженной в килограммах.

В исследовании В.Н. Ильинова [20], проведенном в Томском НИИ кардиологии, сравниваются результаты оценки размеров дуги аорты у новорожденных и детей до года по различным наиболее часто используемым в настоящее время методам оценки Z отклонения. Авторы выявили существенные различия между размерами сегментов дуги аорты при использовании разных диагностических критериев. Е.В. Кривошеков и соавт. [21] рекомендуют для верификации сопутствующей гипоплазии дуги аорты у пациентов с коарктацией и рекоарктацией аорты использовать Z-критерий с расчетом по фактическому росту и нормативной массе, взятой из 50 перцентиля центильных таблиц физического развития детей.

В исследовании E. Sisli и соавт. [22] сравнивались значения оценки выраженности гипоплазии дуги аорты по номограммам Cantinotti, Pettersen и Lopez. Несмотря на наличие корреляции между ними, результаты оценки существенно отличались друг от друга. При внутриутробном исследовании оценка морфометрических показателей дуги аорты путем прямой визуализации может быть затруднена за счет положения плода, недостаточного опыта исследователя, технических возможностей и иных причин. Предложенный нами подход для оценки размеров дуги аорты лишен указанных недостатков, так как не требует прямой визуализации дуги аорты у плода, однако имеет ограничения, связанные с необходимостью получения четкого доплеровского сигнала и коррекции угла ультразвукового луча к потоку крови.

Следует учитывать, что существует большое количество анатомических изменений при различных врожденных пороках сердца, которые уменьшают антеградный поток в восходящую аорту, приводя к развитию патологии дуги аорты [23].

После завершения формирования анатомических структур дуги аорты на 56-е сутки внутриутробного развития размер дуги аорты зави-

сит от гемодинамических факторов. А. Рудольф и соавт. [24] в 1972 г. сформулировали «теорию потока» крови у плода. В соответствии с этой теорией поток крови, проходящий через структуры сердца и магистральные сосуды, определяет их размер при рождении. Эта гипотеза подтверждается наличием сопутствующей гипоплазии дуги у новорожденных в 60–81% случаев.

После 56 сут гестации весь дальнейший период внутриутробного развития дуги аорты определяется объемной скоростью потока крови, формируемого левым желудочком и проходящего через дугу аорты [25]. Таким образом, с этого времени основой формирования гипоплазии дуги аорты и коарктации аорты служат гемодинамические изменения, развившиеся в результате изменения ударного объема левого желудочка. Изучение динамики гемодинамических параметров в норме во время внутриутробного развития служит основой диагностики патологии дуги аорты и понимания особенностей стабилизации состояния новорожденного с врожденной обструкцией левых отделов сердца [26]. Предлагаемый на основании полученных в исследовании данных «гемодинамический подход» для оценки размеров дуги аорты имеет существенные преимущества, так как напрямую учитывает вклад левого желудочка в комбинированный сердечный выброс, что является решающим фактором во время перестройки кровообращения для обеспечения адекватной доставки кислорода и достаточной системной перфузии после рождения.

Ограничения исследования. В исследовании удалось выявить прямые закономерности удовлетворительного развития С сегмента аорты на фоне достаточного ударного объема и объема левого желудочка. Полученные данные дают теоретические основания предполагать, что при уменьшении параметров этих структур существует вероятность формирования гипоплазии или коарктации аорты. Однако прямых данных, указывающих на это, не получено. Это служит основанием для продолжения детализированных исследований внутриутробной гемодинамики и пренатального развития структур системы кровообращения. Оценка анатомических структур сердца и магистральных сосудов на основе эхокардиографии и организация практического обучения специалистов в различных сферах сердечно-сосудистой медицины остается проблемой, решению которой может способствовать применение современных методов клинической пластикации [27–30].

Выводы

1. Гемодинамические характеристики левого желудочка позволяют прогнозировать размеры дуги аорты у плодов гестационного возраста с 29 по 34-ю неделю.

2. Дуга аорты является отражением внутрисердечной гемодинамики, так как морфогометрические

характеристики дуги аорты определяются особенностями ударного объема левого желудочка, конечным

диастолическим объемом левого желудочка и размером фиброзного кольца аортального клапана.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. Brown K.L., Ridout D.A., Hoskote A., Verhulst L., Ricci M., Bull C. Delayed diagnosis of congenital heart disease worsens preoperative condition and outcome of surgery in neonates. *Heart* 2006; 92(6): 1298–1302. DOI: 10.1136/hrt.2005.078097
2. Wren C., Reinhardt Z., Khawaja K. Twenty-year trends in diagnosis of life-threatening neonatal cardiovascular malformations. *Arch Child Fetal Neonatal* 2008; 93(1): 33–35. DOI: 10.1136/adc.2007.119032
3. Evers P.D., Ranade D., Lewin M., Arya B. Diagnostic Approach in Fetal Coarctation of the Aorta: A Cost-Utility Analysis. *J Am Soc Echocardiogr* 2017; 30(6): 589–594. DOI: 10.1016/j.echo.2017.01.019
4. Toole B.J., Schlosser B., McCracken C.E., Stauffer N., Border W.L., Sachdeva R. Importance of Relationship between Ductus and Isthmus in Fetal Diagnosis of Coarctation of Aorta. *Echocardiography* 2016; 33(5): 771–777. DOI: 10.1111/echo.13140
5. Messing B., Cohen S. M., Valsky D.V., Rosenak D., Hochner-Celnikier D., Savchev S., Yagel S. Fetal cardiac ventricle volumetry in the second half of gestation assessed by 4D ultrasound using STIC combined with inversion mode. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2007; 30(2): 141–151. DOI: 10.1002/uog.4036
6. Hornberger L., Sahn D.J., Kleinman C.S., Copel J., Silverman N.H. Antenatal diagnosis of coarctation of the aorta: a multicenter experience. *J Am Coll Cardiol* 1994; 23(2): 417–423. DOI: 10.1016/0735-1097(94)90429-4
7. Schmidt K., Silverman N., Hoffman J. Determination of ventricular volumes in human fetal hearts by two-dimensional echocardiography. *Am J Cardiol* 1995; 76(17): 1313–1316. DOI: 10.1155/2017/4797315
8. Buyens A., Gyselaers W., Coumans A., Nasiry S.A., Willekes C., Boshoff D. et al. Difficult prenatal diagnosis: fetal coarctation. *Facts Views Vis Obgyn* 2012; 4(4): 230–236
9. Achiron R., Zimand S., Hegesh J., Lipitz S., Zalel Y., Rotstein Z. Fetal aortic arch measurements between 14 and 38 weeks' gestation: in-utero ultrasonographic study. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2000; 15(3): 226–230. DOI: 10.1046/j.1469-0705.2000.00068.x
10. Artman M., Mahony L., Teitel D. Neonatal Cardiology (3rd edn). Perinatal Cardiovascular Physiology. McGraw-Hill Education Medica, 2017; 87–120
11. Mor-Avi V., Sugeng L., Weinert L., MacEneaney P., Caiani E.G., Koch R. et al. Fast measurement of left ventricular mass with real-time three-dimensional echocardiography: comparison with magnetic resonance imaging. *Circulation* 2004; 110(13): 4–5. DOI: 10.1161/01.CIR.0000142670.65971.5F
12. Ushakov F.B., Imbar T., Yagel S. Application of free-hand three-dimensional echocardiography in the evaluation of fetal cardiac ejection fraction: a preliminary study. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2004; 23(6): 546–551. DOI: 10.1002/uog.1059
13. Pasquini L., Mellander M., Seale A., Matsui H., Roughton M., Ho S.Y., Gardiner H.M. Z-scores of the fetal aortic isthmus and duct: an aid to assessing arch hypoplasia. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2007; 29(6): 628–633. DOI: 10.1002/uog.4021
14. Al Akhfash A.A., Almesned A.A., Al Harbi B.F., Al Ghamdi A., Hasson M., Al Habshan F.M. Two-dimensional echocardiographic predictors of coarctation of the aorta. *Cardiol Young* 2015; 25(1): 87–94. DOI: 10.1017/S1047951113001790
15. Anuwutnavin S., Satou G., Chang R.K., DeVore G.R., Abuel A., Sklansky M. Prenatal Sonographic Predictors of Neonatal Coarctation of the Aorta. *J Ultrasound Med* 2016; 35(11): 2353–2364. DOI: 10.7863/ultra.15.06049
16. Ross J. *Hurst's The Heart* (9th edn). Assessment of cardiac function and myocardial contractility. London: McGraw-Hill, 1998; 731–735. DOI: 10.1002/clc.4960231119
17. Хубулава Г.Г., Марченко С.П., Старчик Д.А., Суворов В.В., Кривошеков Е.В., Шихвердиев Н.Н., Наумов А.Б. Геометрические и морфологические характеристики корня аорты в норме и при недостаточности аортального клапана. *Хирургия* 2018; 5: 4–12. [Khbulava G.G., Marchenko S.P., Starchik D.A., Suvorov V.V., Krivoshekov E.V., Shihverdiev N.N., Naumov A.B. Geometric and morphological characteristics of the aortic root in norm and in case of aortic valve insufficiency. *Khirurgiya* 2018; 5: 4–12. DOI: 10.17116/hirurgia201854-12 (in Russ.)]
18. Moulart A.J., Bruins C.C., Oppenheimer-Dekker A. Anomalies of the aortic arch and ventricular septal defects. *Circulation* 1976; 53(6): 1011–1015. DOI: 10.1161/01.cir.53.6.1011
19. Karl T.R., Sano S., Brawn W., Mee R.B. Repair of hypoplastic or interrupted aortic arch via sternotomy. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1992; 104(3): 688–695
20. Ильинов В.Н., Кривошеков Е.В., Шипулин В.М. Хирургическое лечение коарктации аорты в сочетании с гипоплазией дуги. *Сибирский Медицинский Журнал* 2014; 29(3): 80–86. [Il'inov V.N., Krivoshekov E.V., Shipulin V.M. Surgical treatment of aortic coarctation in combination with arch hypoplasia. *Sibirskii Meditsinskii Zhurnal* 2014; 29(3): 80–86. (in Russ.)] DOI: 10.29001/2073-8552-2014-29-3-80-86
21. Ильинов В.Н., Якимова Е.В., Ивлев А.Ю., Киселев В.О., Гинько В.Е., Кривошеков Е.В., и др. Опыт хирургического лечения обструкции дуги аорты у детей в условиях антеградной селективной перфузии головного мозга. *Бюллетень НЦССХ им А.Н. Бакулева РАМН «Сердечно-сосудистые заболевания»* 2015; 2(102): 15–20. [Il'inov V.N., Yakimova E.V., Ivlev A.J., Kiselev V.O., Gin'ko V.E., Krivoshekov E.V. et al. O Experience of surgical treatment of aortic arch obstruction in children under conditions of antegrade selective cerebral perfusion. *Bulleten' NCSSH im A.N. Bakuleva RAMN «Serdechno-sosudistye zabolevaniya»* 2015; 2(102): 15–20. (in Russ.)]
22. Sisli E., Kalin S., Tuncer O.N., Ayik M.F., Alper H., Levent R.E. et al. Comparison Between Nomograms Used to Define Pediatric Aortic Arch Hypoplasia: Retrospective Evaluation Among Patients Less Than 1 Year Old with Coarctation of the Aorta. *Pediatr Cardiol* 2019; 40(6): 1190–1198. DOI: 10.1007/s00246-019-02130-2
23. Praagh R.V. Normally and Abnormally Related Great Arteries: What Have We Learned? *World J Pediatr Congenit Heart Surg* 2010; 1(3): 364–385. DOI: 10.1177/2150135110380239
24. Rudolph A.M., Heymann M.A., Spitznas U. Hemodynamic considerations in the development of narrowing of the aorta. *Am J Cardiol* 1972; 30(5): 514–525. DOI: 10.1016/0002-9149(72)90042-2
25. Rudolph A. *Congenital Diseases of the Heart: Clinical-Physiological Considerations* (3rd edn). The fetal circulation. San Francisco: Wiley-Blackwell, 2009; 22–67
26. Хубулава Г.Г., Наумов А.Б., Марченко С.П., Чупаева О.Ю., Селиверстов А.А., Александрович Ю.С. и др. Показатели газового состава крови у новорожденных с синдромом малого сердечного выброса после кардиохирургических

вмешательств. Бюллетень НЦССХ им А.Н. Бакулева РАМН «Сердечно-сосудистые заболевания» 2018; 19(5): 676–687. [Hubulava G.G., Naumov A.B., Marchenko S.P., Chupaeva O.Ju., Seliverstova A.A., Aleksandrovich J.S. *et al.* Indicators of blood gas composition in newborns with small cardiac output syndrome after cardiac surgery. *Bjulleten' NCSSH im A.N. Bakuleva RAMN «Serdechno-sosudistye zabolevaniya»* 2018; 19(5): 676–687. (in Russ.)] DOI: 10.24022/1810-0694-2018-19-5-676-687

27. Старчик Д.А., Диденко М.В., Марченко С.П., Хубулава Г.Г., Покушалов Е.А. Анатомия в кардиоваскулярной медицине: современные технологии в науке и образовании. Патология кровообращения и кардиохирургия 2014; 18(4): 139–143. [Starchik D.A., Didenko M.V.,

Marchenko S.P., Hubulava G.G., Pokushalov E.A. Anatomy in cardiovascular medicine: modern technologies in science and education. *Patologiya krovoobrashheniya i kardiohirurgiya* 2014; 18(4): 139–143. (in Russ.)] DOI: 10.21688/1681-3472-2014-4-139-143

28. Марченко С.П., Настуев Э.Х., Куликов А.Н., Пухова Е.Н., Шихвердиев Н.Н. Функциональная анатомия митрального клапана при его недостаточности. Патология кровообращения и кардиохирургия 2007; 1: 3–6. [Marchenko S.P., Nastuev E.H., Kulikov A.N., Puhova E.N., Shihverdiev N.N. Functional anatomy of the mitral valve in its insufficiency. *Patologiya krovoobrashheniya i kardiohirurgiya* 2007; 1: 3–6. (in Russ.)]

Поступила: 17.07.20

Received on: 2020.07.17

Конфликт интересов:

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов и финансовой поддержки, о которых необходимо сообщить.

Conflict of interest:

The authors of this article confirmed the lack of conflict of interest and financial support, which should be reported.