

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

© Коллектив авторов, 2022

УДК 616.132.14-073.431.1

И.Ю. Барышникова✉, Л.А. Юрпольская, Е.З. Голухова

Векторное картирование кровотока в дуге аорты

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева»
Минздрава России, Москва, Российская Федерация

✉ Барышникова Ирина Юрьевна, канд. мед. наук, науч. сотр.; orcid.org/0000-0001-9445-836X, e-mail: iybaryshnikova@bakulev.ru
Юрпольская Людмила Анатольевна, д-р мед. наук, вед. науч. сотр.; orcid.org/0000-0001-7780-2405
Голухова Елена Зеликовна, д-р мед. наук, профессор, академик РАН, директор; orcid.org/0000-0002-6252-0322

Резюме

Vector Flow Mapping (VFM), или векторное картирование потока, является новой ультразвуковой методикой, позволяющей визуализировать на новом качественном уровне внутрисердечные и внутрисосудистые потоки/вихри крови. Существует крайне мало данных по ее применению у пациентов с врожденными пороками сердца. МР-методика 4D Flow для оценки кровотока заняла основную диагностическую «нишу» для динамического наблюдения пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Рутинное применение магнитно-резонансной томографии у новорожденных и детей в настоящее время невозможно, и перспективным представляется использование ультразвуковой методики VFM.

Высокий риск инвалидизации пациентов после операции коарктации аорты в молодом возрасте диктует необходимость мультисистемного обследования детей с выявлением предикторов развития осложнений и максимальным их устранением. Представляем иллюстрации сопоставления векторных потоков крови в норме и при измененной геометрии дуги аорты без обструкции кровотоку, полученных при помощи трансторакальной эхокардиографии и магнитно-резонансной томографии.

Ключевые слова: vector flow mapping, эхокардиография, магнитно-резонансная томография сердца, 4D Flow, коарктация аорты

Для цитирования: Барышникова И.Ю., Юрпольская Л.А., Голухова Е.З. Векторное картирование кровотока в дуге аорты. *Грудная и сердечно-сосудистая хирургия.* 2022; 64 (6): 688–92. DOI: 10.24022/0236-2791-2022-64-6-688-692

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 15.07.2022
Поступила после рецензирования 16.08.2022
Принята к печати 10.11.2022

И.Ю. Baryshnikova✉, L.A. Yurpol'skaya, E.Z. Golukhova

Vector flow imaging of the aortic arch

Bakoulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery, Moscow, Russian Federation

✉ Irina Yu. Baryshnikova, Cand. Med. Sci., Researcher; orcid.org/0000-0001-9445-836X, e-mail: iybaryshnikova@bakulev.ru
Lyudmila A. Yurpol'skaya, Dr. Med. Sci., Leading Researcher; orcid.org/0000-0001-7780-2405
Elena Z. Golukhova, Dr. Med. Sci., Professor, Academician of RAN, Director; orcid.org/0000-0002-6252-0322

Abstract

Vector flow mapping (VFM) is a new ultrasound tool that allows visualizing intracardiac and intravascular blood flows/vortices. There is a little data about clinical application EchoVFM in children with congenital heart disease. 4D Flow MRI technique for assessing blood flow is the best diagnostic method for the dynamic monitoring of the patients with cardiovascular diseases. But today, it is not possible routine MRI scan in newborns and children. That's why it's seems promising to use the ultrasound VFM in pediatric patients.

A high risk of disability in patients after aortic coarctation at a young age dictates a multisystem examination of children with the identification of predictors of complications and their maximum elimination. We present a comparison Echo and MRI vector flow mapping in normal and altered aortic arch without flow obstruction.

Keywords: vector flow mapping, echocardiography, cardio magnetic resonance imaging, 4D Flow, aortic coarctation

For citation: Baryshnikova I.Yu., Yurpol'skaya L.A., Golukhova E.Z. Vector flow imaging of the aortic arch. *Russian Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery.* 2022; 64 (6): 688–92 (in Russ.). DOI: 10.24022/0236-2791-2022-64-6-688-692

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received July 15, 2022
Revised August 16, 2022
Accepted November 10, 2022

Введение

За последнее десятилетие вслед за стремительным развитием цифровых технологий и повышением вычислительной мощности компьютеров появляются новые методики медицинской визуализации. Ныне в диагностическом арсенале ультразвуковых методик появилась технология, позволяющая детально визуализировать и анализировать сложные внутрисосудистые и кардиальные внутрикамерные потоки крови, что поможет сформировать новое понимание патофизиологии кровообращения при заболеваниях сердца и сосудов. Vector Flow Mapping, или векторное картирование потока – это ультразвуковое программное обеспечение, которое объединяет данные двух методик получения изображения: цветового доплеровского картирования и методики speckle tracking – «отслеживания спеклов» – для визуализации внутрисердечных потоков/вихрей крови [1, 2].

Коарктация аорты является диффузным сердечно-сосудистым заболеванием. Несмотря на успешное хирургическое/интервенционное лечение, пациенты в отдаленном периоде могут иметь клинические проявления левожелудочковой недостаточности при сохранной фракции выброса, а также повышенный риск развития ранней артериальной гипертензии, нарушений ритма сердца, мозгового кровообращения, аневризм аорты и сосудов головного мозга, острого коронарного синдрома и внезапного летального исхода в молодом возрасте [3–6]. И немалую роль в патогенезе данных состояний играет анатомия дуги аорты. Хирургически возможно устранение значимой обструкции кровотоку (коарктации), но не всегда – возврат к физиологическому току крови. С учетом высокого риска инвалидизации таких пациентов в молодом возрасте актуально мультисистемное обследование детей с выявлением предикторов развития осложнений и максимальным их устранением. Традиционная эхокардиография дает возможность оценить изменения кровотока в сегментах суженных сосудов по пиковым скоростям и градиентам давления. Технология VFM позволяет выявить картину ранних изменений кровотока, которые могут привести к сердечной недостаточности задолго до появления симптомов.

Поскольку методика VFM проходит клиническую апробацию и крайне мало данных по ее применению у пациентов с врожденными пороками сердца, представляем иллюстрации сопоставления векторных потоков крови в норме и при измененной геометрии дуги аорты без обструкции кровотоку (градиент систолического давления до 20 мм рт. ст.), полученных при помощи трансторакальной эхокардиографии и магнитно-резонансной томографии. Эхокардиограммы выполнены на ультразвуковом аппарате Lissendo 880 (Fujifilm, Япония). МР-обследование проводили на МР-томографе 1,5 Тл Avanto (Siemens), использовали многоканальную поверхностную катушку для сканирования, ЭКГ-синхронизацию и специализированный пакет для сканирования сердца.

Поскольку методика VFM проходит клиническую апробацию и крайне мало данных по ее применению у пациентов с врожденными пороками сердца, представляем иллюстрации сопоставления векторных потоков крови в норме и при измененной геометрии дуги аорты без обструкции кровотоку (градиент систолического давления до 20 мм рт. ст.), полученных при помощи трансторакальной эхокардиографии и магнитно-резонансной томографии. Эхокардиограммы выполнены на ультразвуковом аппарате Lissendo 880 (Fujifilm, Япония). МР-обследование проводили на МР-томографе 1,5 Тл Avanto (Siemens), использовали многоканальную поверхностную катушку для сканирования, ЭКГ-синхронизацию и специализированный пакет для сканирования сердца.

Нормальная дуга аорты, или «романская» – дуга аорты, имеющая форму полукруга (рис. 1).

Дуга аорты по типу «амбразуры» удлинена и имеет форму буквы «П» (рис. 2).

«Готическая» дуга аорты определяется, если имеется острый угол между восходящей и нисходящей аортой (рис. 3).

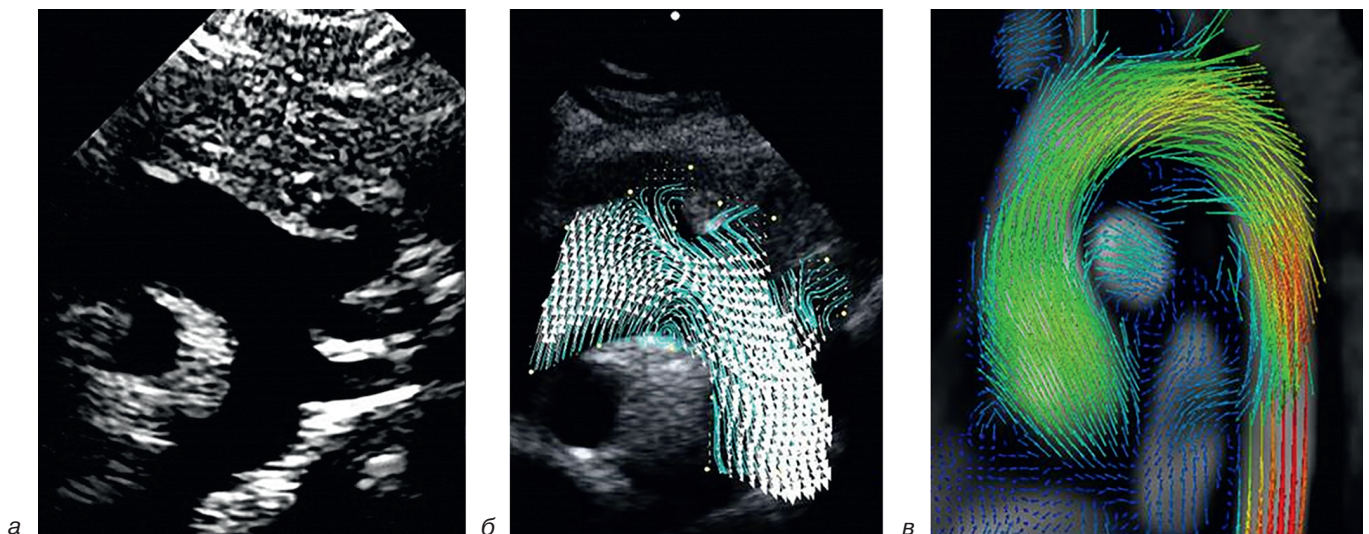


Рис. 1. «Романская» дуга аорты в норме:

а – эхокардиограмма, супрастернальный доступ, проекция по длинной оси аорты; б – эхокардиограмма, Vector Flow Mapping, характеризуется ориентированными параллельно току крови векторами с формированием в конце диастолы одного или двух вихрей (ротация по часовой стрелке) в регионе проксимальной и дистальной дуг; в – MPT 4D FLOW, цветовое картирование скорости и распределения векторов потока

Fig. 1. The "Romanesque" aortic arch is the norm:

а – echocardiogram, suprasternal access, projection along the long axis of the aorta; б – echocardiogram, Vector Flow Mapping, it is characterized by vectors oriented parallel to the blood flow with the formation of one or two vortices (clockwise rotation) in the region of the proximal and distal arc; в – 4D FLOW MRI, color mapping of velocity and distribution of flow vectors

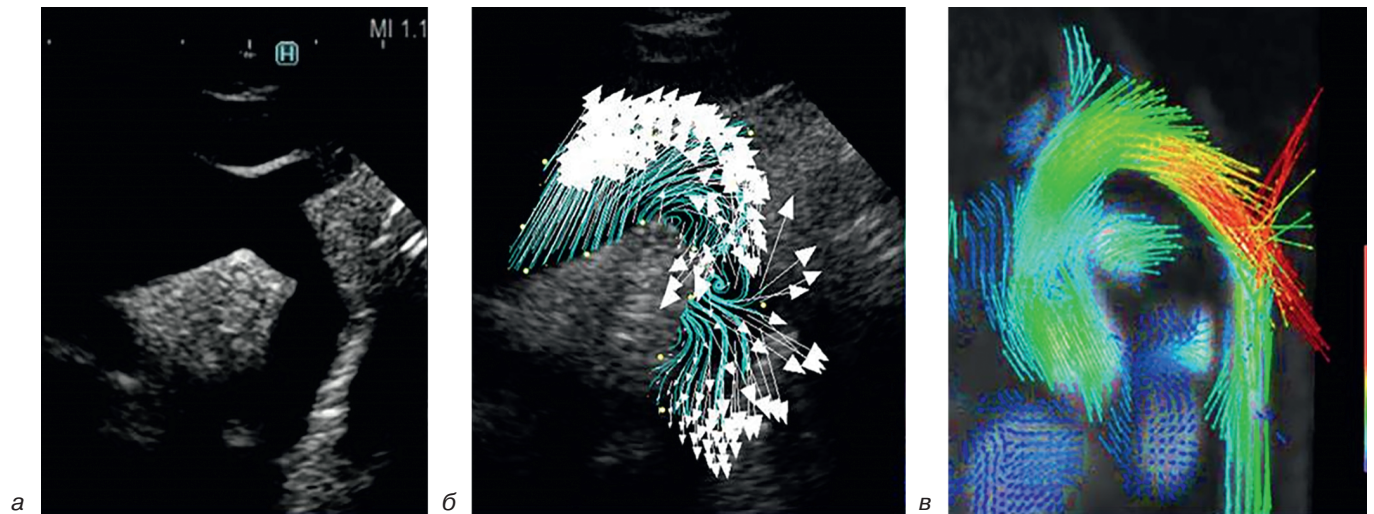


Рис. 2. Дуга аорты по типу «амбразуры»:

а – эхокардиограмма, супрастернальный доступ, проекция по длинной оси аорты; б – эхокардиограмма, Vector Flow Mapping, основной вектор потоков направлен в переднюю стенку аорты, а не в правую общую сонную артерию, являясь причиной патологического ремоделирования дуги – «вытягивание вверх», также формируются турбулентные (против часовой стрелки) и ускоренные потоки в регионе дистальной дуги, затрудняющие естественный ламинарный ток крови в нисходящую аорту, что способствует прогрессированию деформации дуги; в – 4D FLOW MPT, цветовое картирование скорости и распределения векторов потока, увеличение скорости потока в перешейке аорты (красный цвет), отсутствие увеличения скорости кровотока в дистальном отделе нисходящей грудной аорты на уровне диафрагмы

Fig. 2. The aortic arch according to the type of "embrasure":

a – echocardiogram, suprasternal access, projection along the long axis of the aorta; b – echocardiogram, Vector Flow Margin, the main flow vector is directed to the anterior wall of the aorta, and not to the right common carotid artery, being the cause of pathological remodeling of the arch – "pulling up", also, turbulent (counterclockwise) and accelerated flows are formed in the distal arch region, hindering the natural laminar flow of blood into the descending aorta, which contributes to the progression of arch deformation; c – 4D FLOW MRI, color mapping of the velocity and distribution of flow vectors, an increase in the flow rate in the isthmus of the aorta (red), no increase in the blood flow rate in the distal part of the descending thoracic aorta at the level of the diaphragm

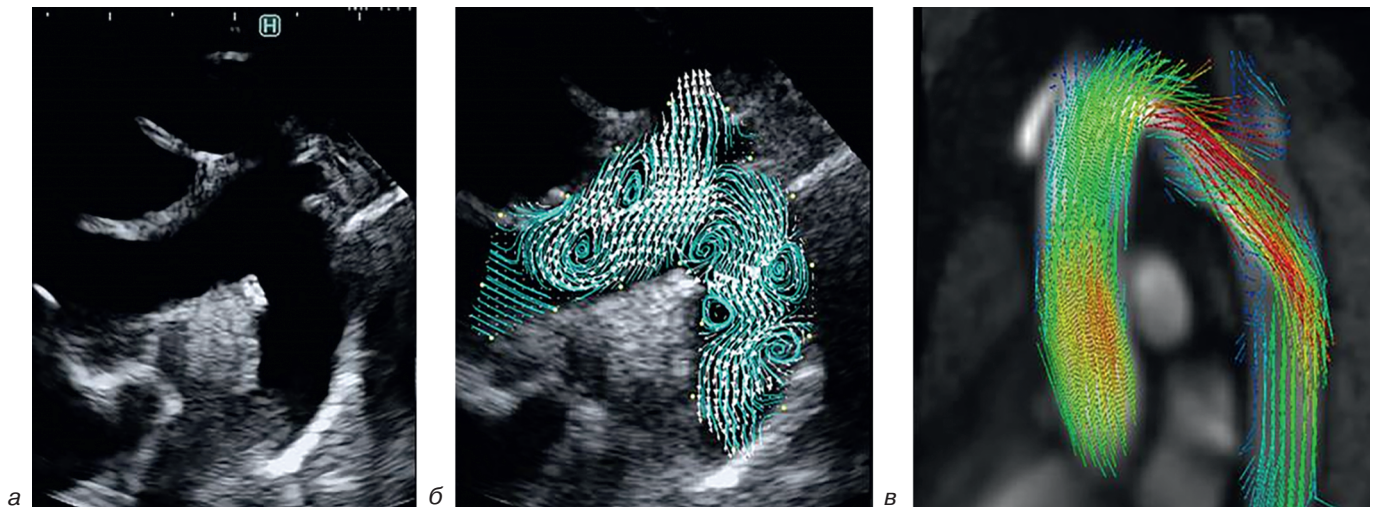


Рис. 3. «Готическая» дуга аорты:

а – эхокардиограмма, супрастернальный доступ, проекция по длинной оси аорты; б – эхокардиограмма, Vector Flow Mapping, основной вектор потоков направлен в переднюю стенку аорты, являясь причиной патологического ремоделирования дуги – «вытягивание вверх», рикошетный поток крови в сторону восходящего отдела аорты будет способствовать расширению преимущественно именно этого отдела аорты, формирование направления вихрей индивидуально в каждом случае в зависимости от анатомической особенной дуги и расположения брахиоцефальных артерий; в – 4D FLOW MPT, цветовое картирование скорости и распределения векторов потока, увеличение скорости потока в дуге и перешейке (красный цвет), отсутствие увеличения скорости кровотока в дистальном отделе нисходящей грудной аорты

Fig. 3. The "Gothic" aortic arch:

a – echocardiogram, suprasternal access, projection along the long axis of the aorta; b – echocardiogram, Vector Flow Margin, the main vector of flows is directed to the anterior wall of the aorta, being the cause of pathological remodeling of the arch – "pulling up", the ricochet flow of blood towards the ascending aorta will contribute to the expansion of mainly this part of the aorta, the formation of the direction of vortices is individual in each case, depending on the anatomical special arc and the location of the brachiocephalic arteries; c – 4D FLOW MRI, color mapping of velocity and distribution of flow vectors, increased flow velocity in the arch and isthmus (red), no increase in blood flow velocity in the distal part of the descending thoracic aorta

Обсуждение

Основным диагностическим методом при обследовании детей с ВПС является эхокардиография, проводимая во время беременности, у новорожденных и детей раннего возраста [7]. Эхокардиография является неинвазивным, экономически эффективным, доступным и высокочувствительным методом исследования сердечно-сосудистой системы. В традиционной эхокардиографии оценка кровотока основана на доплерографии, позволяющей оценивать движение потоков крови только вдоль направления испускаемого ультразвукового луча и, следовательно, зависит от угла, что ограничивает визуализацию сложных потоков [8].

Vector Flow Mapping, или векторное картирование потока, позволяет визуализировать внутрисердечные потоки/вихри крови [1, 2]. Кровоток может быть охарактеризован расположением вихря, его морфологией (длина, ширина и площадь) и такими параметрами, как интенсивность вихря, циркуляция и время его образования. Энергия вихрем также может быть измерена, включая кинетическую энергию, рассеяние энергии. Параметры потока, такие как основной и остаточный поток, также могут быть использованы для более тщательной диагностики патологических состояний сердца и сосудов в будущем.

Существует три основных варианта представления информации с помощью методики Vector Flow Mapping: карта вихревых потоков; Stream линии; карта потери энергии: при протекании через левый желудочек в период от диастолы до систолы кровь, притекающая в левый желудочек, накапливает и запасает кинетическую энергию. Ярко-желтые области указывают на более высокие значения потери энергии. Возможен количественный подсчет. Карта относительного давления показывает разность давления внутри левого желудочка, которая является индикатором сердечной деятельности, дающим важную информацию для клинической оценки состояния сердца. Область высокого давления картируется красным цветом, область низкого давления – синим [2]. В своей работе для визуализации кровотока в дуге аорты мы использовали только двухмерную карту вихревых потоков и Stream линии. Внутрисердечные и внутрисосудистые потоки пространственно сложны, и при использовании двухмерного ультразвукового исследования не учитывается внеплоскостное движение потока. Чтобы полностью понять сложные схемы кровотока в детском сердце, необходимо использовать трехмерную технологию VFM или специальные программы оценки кровотока при МР-сканировании.

Магнитно-резонансная томография сердца (прорывные технологии не только сканирования, но и обработки изображений) заняла основную диагностическую «нишу» для динамического наблюдения. Одной из новых МР-методик является МР-программа 4D Flow для оценки кровотока [9].

Методика позволяет ретроспективно наглядно представить 3D-геометрию кровотока с цветовым картированием скоростей, направления потока в произвольно выбранных участках сосудистого русла и рассчитывать количественные показатели потока. Сканирование осуществляется на свободном дыхании, без введения контрастных препаратов и может быть использовано на различных этапах катamnестического наблюдения, благодаря чему методика стала применимой для обследования детей [9–11].

Однако применение МРТ у новорожденных и детей раннего возраста имеет свои недостатки, связанные с необходимостью проведения анестезии и продолжительного времени сканирования. В свою очередь новая эхокардиографическая методика VFM является целесообразной для комплексного обследования пациентов с коарктацией аорты, особенно младшего возраста. Мы описали характерные паттерны векторного картирования кровотока при различных вариантах строения дуги аорты с помощью ультразвуковой технологии VFM и их сопоставимость с таковыми при МР-сканировании. Поэтому применение технологии Vector Flow Mapping представляется перспективным для раннего выявления аномального паттерна кровотока, отслеживания динамики процесса ремоделирования дуги и кровотока в ней у детей младшего возраста с последующим всесторонним анализом при помощи МРТ. Однако для окончательного утверждения характера взаимосвязи между измененным кровотоком в грудной аорте и возникшими осложнениями необходимы масштабные исследования и длительное наблюдение за пациентами с выявленными патологическими паттернами кровотока.

Заключение

Представленные паттерны кровотока при различных вариантах анатомии дуги аорты с помощью ультразвуковой технологии VFM и 4D Flow MPT позволяют на новом качественном уровне визуализировать ранние изменения кровотока, которые могут привести к сердечной недостаточности задолго до появления симптомов. В комплексе с другими диагностическими методиками это, возможно, улучшит отбор пациентов для медикаментозного или хирургического лечения.

Литература/References

1. Hansen K.L., Juul K., Møller-Sørensen H., Nilsson J.C., Jensen J.A., Nielsen M.B. Pediatric transthoracic cardiac vector flow imaging – a preliminary pictorial study ultrasound. *Int. Open.* 2019; 5: E20–E26. DOI: 10.1055/a-0656-5430
2. Avesani M., Degrelle B., Di Salvo G., Thambo J.B., Iriart X. Vector flow mapping: A review from theory to practice. *Echocardiography.* 2021; 38 (8): 1405–13. DOI: 10.1111/echo.15154. Epub 2021 Jul 14.
3. Nozaki Yo., Nakayama-Inaba K., Ishizu T., Iida N., Kato Y., Hiramatsu Y., Horigome H. Endothelial dysfunction of conduit arteries in patients with repaired coarctation of the aorta. *Int. Heart J.* 2018; 59: 1340–5. DOI: 10.1536/ihj.17-5641

Brief Reports

4. Hope M.D., Meadows A.K., Hope T.A., Ordovas K.G., Saloner D., Reddy G.P. et al. Clinical evaluation of aortic coarctation with 4D flow MR imaging. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2010; 31: 711–8. DOI: 10.1002/jmri.22083
5. Dijkema E.J., Leiner T., Grotenhuis H.B. Diagnosis, imaging and clinical management of aortic coarctation. *Heart.* 2017; 103 (15): 1148–55. DOI: 10.1136/heartjnl-2017-311173
6. Ким А.И., Рогова Т.В., Верещагина А.М., Машина Т.В.. Коарктация аорты: нуждается ли пациент, оперированный в раннем возрасте, в дальнейшем наблюдении? *Креативная кардиология.* 2015; 1: 46–52.
Kim A.I., Rogova T.V., Vereshchagina A.M., Mashina T.V. Coarctation of the aorta: does the patient, operated at an early age, have to be observed later? *Creative Cardiology.* 2015; 1: 46–52 (in Russ.).
7. Bharucha T., Mertens L. Recent advances in pediatric echocardiography. *Expert Rev. Cardiovasc. Ther.* 2013; 11: 31–47. DOI: 10.1586/erc.12.168
8. Evans D.H., McDicken N., Skidmore R., Woodcock J.P. Doppler ultrasound, Physics. Instrumentation and Clinical Applications. New York: John Wiley & Sons; 1989.
9. Ota H., Higuchi S., Sun W., Ueda T., Takase K., Tamura H. Four dimensional flow magnetic resonance imaging for cardiovascular imaging: from basic concept to clinical application. *CVIA.* 2018; 2 (2): 85–96. DOI: 10.22468/cvia.2018.00045
10. Pineda J., Abad P., Mesa S., Rascovsky S., Delgado J. Clinical applications of the 4D flow technique in the hemodynamic evaluation of congenital heart diseases. *Rev. Colomb. Radiol.* 2018; 29 (2): 4901–7.
11. Van Ooij P., Farag E.S., Blanken C.P.S., Nederveen A.J., Groenink M., Planken R.N., Boekholdt S.M. Fully quantitative mapping of abnormal aortic velocity and wall shear stress direction in patients with bicuspid aortic valves and repaired coarctation using 4D flow cardiovascular magnetic resonance. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* 2021; 23 (1): 9. DOI: 10.1186/s12968-020-00703-2

Вклад авторов: Барышникова И.Ю. – разработка дизайна исследования, сбор клинического материала, обработка, анализ и интерпретация данных, написание текста рукописи; Юрпольская Л.А. – разработка дизайна исследования, сбор клинического материала, обработка, анализ и интерпретация данных, проверка критически важного содержания, утверждение рукописи для публикации; Голухова Е.З. – проверка критически важного содержания, утверждение рукописи для публикации.

Contribution: Baryshnikova I.Yu. – study concept and design, material collection and processing, formal analysis and investigation, writing – original draft; Yurpol'skaya L.A. – study concept and design, material collection and processing, formal analysis and investigation, supervision and validation, approval of the final version; Golukhova E.Z. – supervision and validation, approval of the final version.