

ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ В ДИАГНОСТИКЕ И ПРЕДОПЕРАЦИОННОМ ПЛАНИРОВАНИИ ТЕТРАДЫ ФАЛЛО

Хасанова К.А.^{1,2}, Терновой С.К.^{2,3}, Абрамян М.А.^{1,4}

1 – ГБУЗ г. Москвы «Морозовская детская городская клиническая больница ДЗМ». г. Москва, Россия.

2 – ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет им.

И. М. Сеченова МЗ РФ (Сеченовский университет). г. Москва, Россия.

3 – Институт клинической кардиологии им. А.Л. Мясникова, ФГБУ «НМИЦ кардиологии» МЗ РФ. г. Москва, Россия.

4 – ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов». г. Москва, Россия.

Цель исследования. Оценить возможности трансторакальной ЭХО-КГ, КТ и МРТ сердца в диагностике и предоперационном планировании тетрады Фалло.

Материалы и методы. В исследование включено 85 детей с входящим клиническим диагнозом – тетрада Фалло. Средний возраст пациентов составил 8,1 (3,4; 8,1) месяцев. Всем детям проведена трансторакальная ЭХО-КГ, 72 – КТ сердца, 36 – МРТ сердца, 52 – прямая ангиография (диагностическая или в рамках выполнения эндоваскулярного этапа коррекции порока). При проведении ЭХО-КГ, КТ и МРТ сердца оценивались возможности каждого метода в определении хирургически важных сопутствующих аномалий: дополнительных источников легочного кровообращения, праволежащей дуги аорты, aberrантной подключичной артерии, аномалий коронарных артерий, венозного возврата и легочных артерий. Все результаты сопоставлялись с данными прямой ангиографии и/или интраоперационными показателями. Интервал между трансторакальной ЭХО-КГ, КТ и/или МРТ сердца и проведенной АГ либо открытым хирургическим вмешательством был менее 10 дней.

Результаты. Все три метода показали 100% точность в постановке диагноза тетрады Фалло у детей. Диагностическая точность метода трансторакальной ЭХО-КГ статистически значимо уступала КТ сердца в определении наличия больших аортолегочных коллатеральных артерий ($p=0,001$). В диагностике аномалий дуги аорты и ее ветвей, венозного возврата, легочных артерий и коронарных артерий диагностическая точность метода была также ниже чем у КТ и МРТ ($p>0,005$). Томографические методики в определении аномалий дуги аорты и ее ветвей, легочных артерий, венозного возврата и дополнительных источников легочного кровоснабжения имели высокие показатели диагностической эффективности (98-100%).

Обсуждение. Высокая эффективность и широкое применение ЭХО-КГ, КТ и МРТ сердца в комплексной оценке тетрады Фалло у детей и отсутствие унифицированного диагностического алгоритма определяют актуальность сравнения возможностей неинвазивных методов кардиовизуализации в предоперационном планировании коррекции данного ВПС. С учетом развития трансторакальной ЭХО-КГ, существуют различные точки зрения о необходимости рутинного применения как томографических методик, так и прямой АГ. Результаты проведенных исследований по сравнению возможностей методов кардиовизуализации в оценке хирургических рисков у детей с тетрадой Фалло (ТФ) немногочисленны и неоднозначны. В настоящем исследовании на достаточном количестве материала проведена оценка возможностей всех неинвазивных методов (ЭХО-КГ, КТ сердца и кардио-МРТ) в оценке хирургических рисков у детей с ТФ до года и младшей возрастной группы в рамках первичного предоперационного планирования.

Заключение. ЭХО-КГ остается первоочередным эффективным методом в диагностике тетрады Фалло у детей, но не может считаться окончательной предоперационной диагностической методикой, в виду ограничений в оценке сочетанных, хирургически важных, экстракардиальных аномалий. КТ сердца показала себя высокоэффективным методом в оценке клинически важных сопутствующих анатомических особенностей у пациентов с тетрадой Фалло и может быть окончательным инструментом в планировании хирургической коррекции порока. МРТ сердца также позволяет получить всю необходимую информацию для планирования хирургического лечения тетрады Фалло, однако длительность исследования и продолжительное пребывание пациентов в наркозе требуют строгого обоснования целесообразности применения МРТ при условии наличия технической возможности выполнения КТ сердца в клинике и отсутствия

у ребенка противопоказаний к введению рентгеноконтрастных препаратов.

Ключевые слова: тетрада Фалло, ТФ, КТ сердца, ЭХО-КГ, МРТ сердца, дети, врожденные пороки сердца, ВПС, катетеризация полостей сердца, прямая ангиография, АГ, легочная артерия, ЛА.

Контактный автор: Хасанова К.А., e-mail: KHasanova@morozdgkb.ru

Для цитирования: Хасанова К.А., Терновой С.К., Абрамян М.А. Возможности современных методов визуализации в диагностике и предоперационном планировании тетрады Фалло. REJR 2023; 13(4):56-68. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-4-56-68.

Статья получена: 25.10.23

Статья принята: 07.11.23

POSSIBILITIES OF MODERN IMAGING MODALITIES IN THE DIAGNOSIS AND PREOPERATIVE ASSESMENT OF TETRALOGY OF FALLOT

Khasanova K.A.^{1,2}, Temovoy S.K.^{2,3}, Abramyan M.A.^{1,4}

1 - Morozovskaya Children's City Clinical Hospital.

2 - Sechenov University.

3 - A.L. Myasnikov Institute of Clinical Cardiology.

4 - Peoples' Friendship University of Russia. Moscow, Russia.

Purpose. To evaluate the potential of transthoracic TTE, CT and MRI of the heart in the diagnosis and preoperative planning of tetralogy of Fallot (TF).

Materials and Methods. The study comprised 85 children with an incoming clinical diagnosis of tetralogy of Fallot. The average age of the patients was 8.1 (3.4; 8.1) months. All children underwent TTE, 72 – cardiac CT, 36 – cardiac MRI, 52 – conventional angiography. The capabilities of TTE, Cardiac CT and MRI in identifying surgically important concomitant anomalies were assessed: additional sources of pulmonary circulation, right sided aortic arch, aberrant subclavian artery, anomalies of the coronary arteries, venous return and pulmonary arteries. All results were compared with conventional angiography data and/or intraoperative indicators. The interval between TTE, CT and/or MRI of the heart and the performed conventional angiography or open surgery was less than 10 days.

Results. All three methods showed 100% accuracy in diagnosing tetralogy of Fallot in children. TTE was statistically significantly inferior to cardiac CT in determining the presence of large aortopulmonary collateral arteries in patients with TF ($p=0.001$). In the diagnosis of anomalies of the aortic arch and its branches, venous return, pulmonary arteries and coronary arteries, the diagnostic accuracy of the method was also lower than that of CT and MRI ($p>0.005$). Tomographic techniques in determining anomalies of the aortic arch and its branches, pulmonary arteries, venous return and additional sources of pulmonary blood supply had very high rates of diagnostic efficiency (98-100%).

Discussion. The high efficiency and wide application of TTE, CT and MRI of the heart in the comprehensive assessment of tetralogy of Fallot in children and the lack of a unified diagnostic algorithm determine the relevance of comparing the capabilities of non-invasive methods of cardiac imaging in preoperative planning for the correction of this congenital heart defect. Taking into account the development of the transthoracic echocardiography method, there are different points of view on the need for routine use of both tomographic techniques and conventional angiography. The results of studies comparing the capabilities of cardiac imaging methods in assessing surgical risks in children with tetralogy of Fallot are few and ambiguous. In this study, using a sufficient amount of material, we assessed the capabilities of all non-invasive methods (TTE, cardiac CT and cardio-MRI) in assessing surgical risks in children with tetralogy of Fallot up to one year old and in the younger age group as part of primary preoperative planning.

Conclusion. TTE is the primary method in diagnosing tetralogy of Fallot in children, but cannot be considered the final preoperative diagnostic technique, due to limitations in the assessment of combined, surgically important, extracardiac anomalies. Cardiac CT is highly effective in assessing important associated anatomical features in patients with tetralogy of Fallot and can be a definitive

tool in planning surgical correction. Cardiac MRI allows to obtain all the necessary information for planning surgical treatment of tetralogy of Fallot, however, the duration of the study and the long stay of patients under anesthesia require strict justification for the feasibility of using MRI, provided that the child has no contraindications to the administration of radiopaque contrast agents and there is the technical ability to perform cardiac CT in the clinic.

Keywords: tetralogy of Fallot, TOF, cardiac CT, TTE, cardiac MRI, children, congenital heart disease, conventional angiography, pulmonary artery.

Corresponding author: Khasanova K.A., e-mail: KHasanova@morozdgb.ru

For citation: Khasanova K.A., Ternovoy S.K., Abramyana M.A. Possibilities of modern imaging modalities in the diagnosis and preoperative assesment of tetralogy of Fallot. REJR 2023; 13(4):56-68. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-4-56-68.

Received: 25.10.23

Accepted: 07.11.23

В Тетрада Фалло (ТФ) является второй по частоте сложной врожденной сердечной аномалией и составляет 7-10% от всех врожденных пороков сердца (ВПС) с частотой встречаемости 0,5 на 10000 живорожденных детей [1]. Среди ВПС, требующих хирургической коррекции в младенческом возрасте на долю ТФ приходится 15%. Без хирургической коррекции порока смертность детей с ТФ в течение первого года жизни составляет 33%, к 3-м годам – до 50%, к 10 годам – 70%, к 40 годам жизни – 95% [2]. Двадцатипятилетняя выживаемость пациентов с тетрадой Фалло после выполнения радикальной хирургической коррекции порока составляет – 95% [3].

Тетрада Фалло относится к порокам конотрункуса, при которых основным субстратом развития сердечных аномалий является смещение эмбриональной конусной перегородки в сторону легочной артерии. В результате смещения формируются все анатомические компоненты порока: подаортальный дефект межжелудочковой перегородки (ДМЖП), сужение выводного отдела правого желудочка (ВОПЖ) и/или легочной артерии (ЛА), гипертрофия правого желудочка (ПЖ) и декстрапозиция аорты (Ao) [4].

У пациентов с тетрадой Фалло ветви лёгочной артерии в большинстве случаев гипоплазированы с наличием различной степени выраженности периферических стенозов и, как следствие, развитием системных коллатеральных артерий. В 20-25% ТФ сочетается с праволежащей дугой аорты, в 3-5% – с аномальным ходом коронарных артерий. Степень развития легочно-артериального русла, наличие больших аорто-легочных коллатералей (БАЛКА), анатомия коронарных артерий и магистральных сосудов дуги аор-

ты являются важными факторами, определяющими выбор хирургической тактики ведения этой группы пациентов и возможность выполнения одномоментной радикальной коррекции [5].

Учитывая высокие показатели выживаемости пациентов с тетрадой Фалло после проведения хирургического лечения, корректная предоперационная оценка порока с определением возможностей проведения радикальной коррекции является определяющим этапом в ведении этой группы пациентов. Основными диагностическими задачами в определении тактики хирургической коррекции ТФ у детей являются визуализация легочных артерий с оценкой степени выраженности их гипоплазии, выявление дополнительных источников легочного кровоснабжения (БАЛКА и ОАП), определение наличия аномалий дуги аорты и ее магистральных сосудов, оценка устья и хода коронарных артерий [6].

В мировой и отечественной практике первоочередным методом в постановке диагноза ТФ у детей является трансторакальная ЭХО-КГ, которая обеспечивает точную морфофункциональную оценку сердца и магистральных сосудов, являясь безопасной, неинвазивной и не требующей использования контрастных препаратов методикой [2, 7].

В современных работах, посвященных оптимизации диагностического алгоритма ведения детей с тетрадой Фалло, трансторакальная ЭХО-КГ заявляется рядом авторов как окончательная предоперационная диагностическая методика с высокими показателями эффективности как в постановке самого диагноза, так и в оценке интра- и экстракардиальной анатомии с дальнейшей оценкой хирургических рисков [8]. Несмотря на широкие возможности, ЭХО-КГ не всегда

дает исчерпывающие ответы на вопросы, имеющие решающее значение в алгоритме ведения детей с ТФ: оценка дистальных отделов ЛА, выявление праволежащей дуги аорты, аберрантной подключичной артерии и аномального хода коронарных артерий [9]. В настоящее время в отечественной практике алгоритм ведения детей с ТФ на дооперационном этапе включает в себя рутинное проведение трансторакальной ЭХО-КГ и дополняется проведением прямой ангиографии (АГ) для морфометрии системы ЛА с последующим расчётом z-score, индексов Nakata и McGoop, определения наличия открытого артериального протока (ОАП), БАЛКА, возможных аномалий дуги аорты и иных сочетанных ВПС. Диагностическая катетеризация камер сердца с прямой ангиографией всё еще остается «золотым стандартом» предоперационного планирования коррекции тетрады Фалло у детей [10].

Прямая ангиография даёт исчерпывающую информацию о степени выраженности гипоплазии системы ЛА, о наличии сочетанных интра- и экстракардиальных аномалий, и дополнительных источников легочного кровоснабжения, однако, являясь инвазивной методикой, имеет большее количество рисков и осложнений в виде возможного развития кровотечения, травматизации и окклюзии сосуда, используемого для доступа [10, 11].

В последнее время конкурирующими с прямой ангиографией инструментами в визуализации интра- и экстракардиальной анатомии стали неинвазивные томографические методики: КТ и МРТ сердца с внутривенным болюсным контрастированием [11]. Ввиду длительного времени сканирования и, как следствие, относительно продолжительного пребывания ребенка в наркозе, кардио-МРТ на дооперационном этапе не применяется рутинно у детей с ВПС и не выполняется у детей в тяжелом состоянии, с критическими сердечными аномалиями и кардиореспираторными нарушениями [12]. Также за счет ограничений в пространственном разрешении и высокой ЧСС оценка хода коронарных артерий при проведении кардио-МРТ у детей до года резко затруднена [13]. В связи с этим, появляется все больше работ по изучению возможностей КТ сердца с внутривенным контрастированием у детей с тетрадой Фалло, проводится сравнение диагностической эффективности КТ сердца с прямой ангиографией в оценке хирургических рисков и возможностей проведения одномоментной коррекции порока на дооперационном этапе у детей с тетрадой Фалло [14 - 16].

Учитывая высокие диагностические возможности, широкую доступность и безопасность трансторакальной ЭХО-КГ, наличие объективных ограничений и рисков при проведении прямой ангиографии у детей и стремительное развитие возможностей томографических методик, высказываются различные точки зрения об использовании тех или иных диагностических алгоритмов на этапе первичного дооперационного планирования у детей с ТФ, что определяет актуальность проведения сравнительного анализа возможностей всех кардиовизуализационных методов (трансторакальная ЭХО-КГ, КТ сердца, кардио-МРТ) в диагностике и оценке детальной анатомии порока.

Цель исследования.

Оценить возможности трансторакальной ЭХО-КГ, КТ и МРТ сердца в диагностике тетрады Фалло и предоперационном планировании.

Материалы и методы.

В исследование включено 85 детей с входящим клиническим диагнозом – тетрада Фалло (ТФ), которые поступили в «ГБУЗ Морозовская ДГКБ ДЗМ» в период с 2019 по 2023 гг. Средний возраст пациентов составил 8,1 (3.4; 8.1) месяцев (74% детей грудного возраста, 21% – младшей возрастной группы (от года до 5 лет), 5% – новорожденных). Все дети до выполнения КТ и/или МРТ сердца и прямой ангиографии (АГ) были обследованы по общеклинической схеме, принятой в «ГБУЗ Морозовская ДГКБ ДЗМ» для ведения пациентов с ВПС, которая из инструментальных методов диагностики включает в себя проведение ЭКГ, ЭХО-КГ и рентгенографии органов грудной клетки. В рамках предоперационного планирования для уточнения морфологических особенностей порока и оценки развития системы ЛА 72 пациентам была выполнена КТ сердца с болюсным контрастным усилением (КУ), 36 – МРТ сердца, 10 – диагностическая катетеризация полостей сердца с прямой АГ. 42 пациентам прямая АГ была проведена в рамках паллиативного эндоваскулярного этапа коррекции порока. КТ и МРТ сердца были выполнены 21 ребенку.

ЭХО-КГ выполняли на ультразвуковом аппарате фирмы GE ViVid E95 и Philips iE33 xMatrix с использованием секторных поличастотных датчиков с частотой 3-8 МГц. Исследование включало протоколы двухмерной эхокардиографии, доплерографии и цветного доплеровского картирования (ЦДК).

КТ сердца была проведена у 72 из 85 пациентов (85%), исследование выполнялось на фоне общей медикаментозной седации.

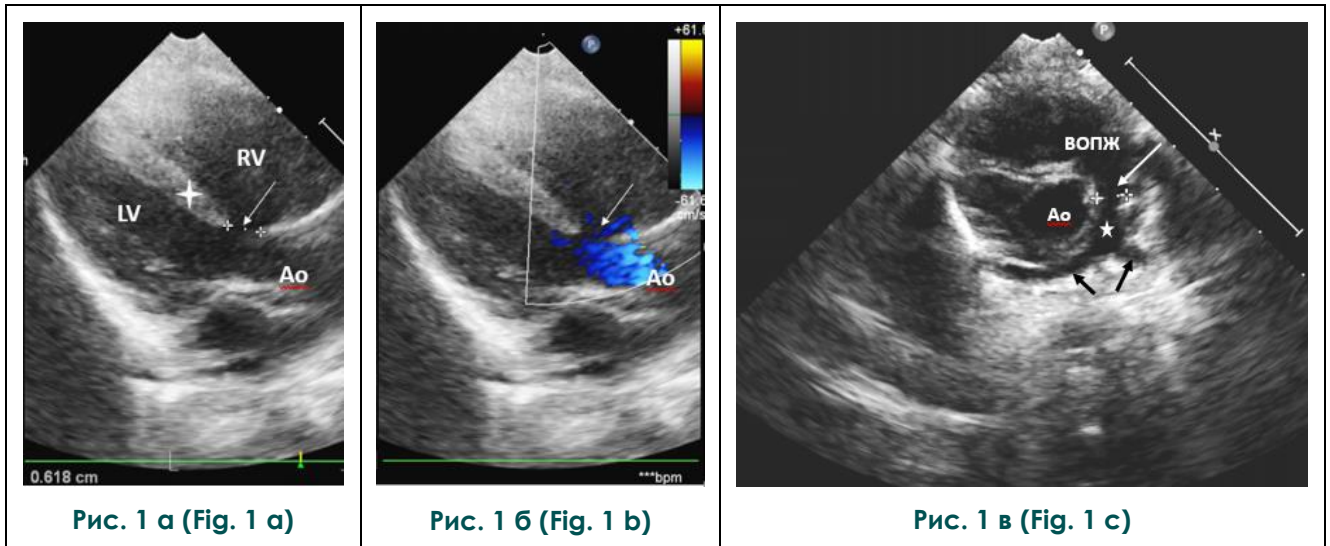


Рис. 1. Трансторакальная ЭХО-КГ. Пациент А., 3 дня.

а – Парастеральный доступ по длинной оси. Изображение желудочков сердца и межжелудочковой перегородки (звездочка). Определяется большой (до 6 мм) дефект межжелудочковой перегородки (стрелка). Аорта отходит бивентрикулярно (декстрапозиция аорты).

б – Парастеральный доступ по длинной оси, режим цветного доплеровского картирования. Большой веноартериальный сброс – поток крови из правого желудочка через дефект межжелудочковой перегородки направлен в аорту (стрелка).

в – Парастеральный доступ по короткой оси. Клапанно-подклапанный стеноз легочной артерии (белая стрелка). Гипоплазия легочного ствола (звездочка) и обеих легочных артерий (черные стрелки).

Fig. 1. TTE of tetralogy of Fallot. Patient A., 3 days.

а – Parasternal long axis approach. Image of the heart chambers and interventricular septum (asterisk). A large (up to 6 mm) ventricular septal defect is detected (arrow). The aorta arises biventricularly (dextroposition of the aorta).

б – Parasternal long axis access, color Doppler mapping mode. Large shunt – blood flow from the right ventricle through the ventricular septal defect into the aorta (arrow).

с – Parasternal short axis approach. Combined pulmonary stenosis (white arrow). Hypoplasia of the pulmonary trunk (asterisk) and both pulmonary arteries (black arrows).

КТ сердца проводили на 256-срезовом компьютерном томографе Philips Brilliance iCT, с шириной детектора – 8 см, с ретро-спективной ЭКГ-синхронизацией и без неё. Использовали толщину реконструируемых срезов 0,625 и 1,5 мм. В качестве контрастного вещества применяли неионный низкоосмолярный контрастный препарат – Ультравист-350, внутривенное введение осуществляли с помощью двухколбового шприца-инжектора в объёме 1,5-2 мл/кг со скоростью 0,4-1,5 мл/с. Постпроцессорная обработка выполнялась на мультимодальных рабочих станциях с построением трехмерных реконструкций.

МРТ сердца была проведена 36 пациентам, исследование выполнялось на фоне общей медикаментозной седации. Исследование проводили на высокопольном МР-

томографе Philips Ingenia базовой комплектации с напряженностью магнитного поля 1,5 Тесла с использованием кардиопакета для сканирования и дальнейшей обработки данных. Для морфометрии системы ЛА использовались импульсные последовательности на основе «градиент-эхо» с проспективной синхронизацией по сигналу ЭКГ (балансированное градиентное ЭХО с инверсией – ВТФЕ-последовательность) и синхронизацией с дыханием. Для проведения морфометрии ствола ЛА, пЛА и лЛА, морфологии и функции сердца срезы ориентировали в трех стандартных плоскостях и в плоскостях, аналогичных эхографическим проекциям: двух- и четырехкамерным. Внутривенное болюсное контрастирование при проведении кардио-МРТ выполнялось по назначению направляющего врача с целью оценки струк-

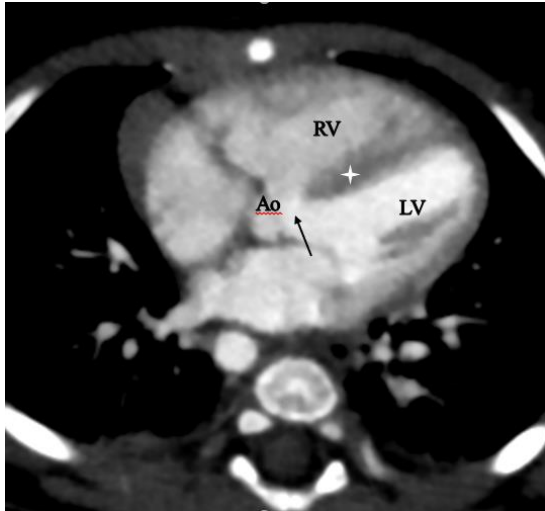


Рис. 2 а (Fig. 2 а)

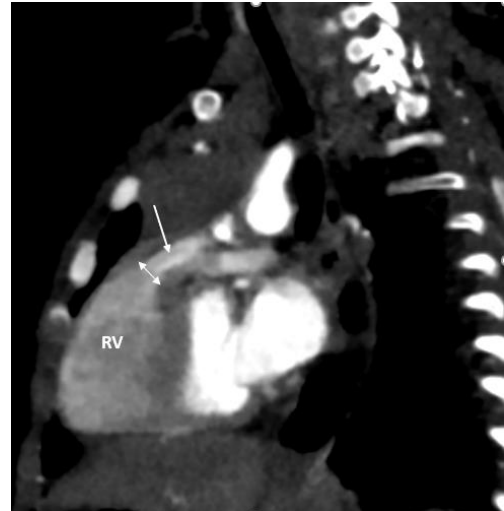


Рис. 2 б (Fig. 2 б)

Рис. 2. КТ сердца в условиях медикаментозной седации с болюсным контрастированием, без ЭКГ-синхронизации. Тот же пациент, что и на рисунке 1, 4 дня.

а – Косо-аксиальная плоскость. Изображение желудочков сердца и межжелудочковой перегородки (звездочка). Определяется большой (до 6 мм) дефект межжелудочковой перегородки (стрелка). Аорта отходит бивентрикулярно (декстрапозиция аорты).

б – Косо-сагиттальная плоскость. Комбинированный стеноз легочной артерии (стрелка), сужение выводного отдела правого желудочка (двойная стрелка).

Fig. 2. Cardiac CT with anesthesia and contrast enhancement, no ECG-gating. Same patient as on figure 1, 4 days.

a – Oblique axial plane. Imaging of the heart ventricles and the interventricular septum (asterisk). A large (up to 6 mm) ventricular septal defect is detected (arrow). Dextroposition of the aorta.

b – Oblique sagittal plane. Combined pulmonary artery stenosis (arrow), narrowing of the right ventricular outflow tract (double arrow).

турных изменений миокарда.

Катетеризация полостей сердца с АГ (диагностическая и в рамках паллиативного эндоваскулярного этапа коррекции порока) была выполнена 52 детям на фоне общей медикаментозной седации на ангиографическом комплексе Philips Allura Centron.

Анализировалась способность трансторакальной ЭХО-КГ, КТ и МРТ сердца диагностировать наличие праволежащей дуги аорты, aberrантной подключичной артерии, сопутствующих аномалий легочных артерий (кроссинг ЛА, атрезия устья одной из ЛА, дуктальное отхождение ЛА) и венозного возврата (аномалии полых и легочных вен), определять дополнительные источники легочного кровоснабжения (ОАП и БАЛКА) и оценивать ход коронарных артерий.

Все полученные результаты сопоставлялись данными прямой ангиографии, интраоперационными данными и данными аутопсии (при ее наличии). Интервал между трансторакальной ЭХО-КГ, КТ и/или МРТ

сердца и проведенной АГ либо открытым хирургическим вмешательством не превышал 10 дней.

Результаты.

Диагностическая точность трансторакальной ЭХО-КГ в постановке диагноза ТФ составила 100% (AUC 1,00) (рис. 1).

Томографические методики (КТ и МРТ сердца) также не имели ошибочных результатов в диагностике ТФ: точность обоих методов – 100% (AUC 1,00) (рис. 2 и рис. 3).

В оценке наличия сочетанных хирургически важных аномалий методы кардиовизуализации играют разную роль.

Определение наличия аномалий дуги аорты (праволежащая дуга аорты, двойная дуга аорты)

У 18 детей интраоперационно и/или ангиографически были определены аномалии дуги аорты: праволежащая дуга аорты у 17 детей, у одного ребенка – двойная дуга аорты. По результатам трансторакальной ЭХО-КГ сопутствующие аномалии дуги аорты бы-



Рис. 3 а (Fig. 3 а)

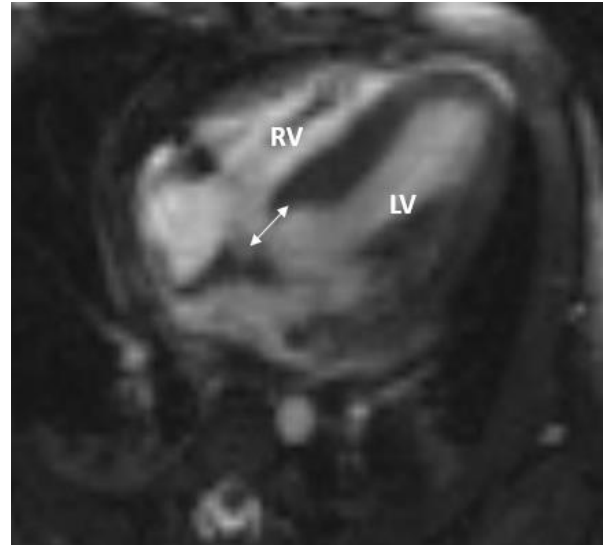


Рис. 3 б (Fig. 3 б)

Рис. 3. Кардио-МРТ в условиях медикаментозной седации. Пациент Д., 3 месяца.

а – Кино-МРТ, плоскость выводного отдела правого желудочка. Сужение выводного отдела правого желудочка (круг).

б – Кино-МРТ, 4-х камерная плоскость. Определен большой субаортальный дефект межжелудочковой перегородки (двойная стрелка).

Fig. 3. Cardio-MRI with anesthesia. Patient D., 3 months.

a – Cine MRI, right ventricle outflow tract plane. Narrowing of the outflow tract of the right ventricle (circle).

b – Cine MRI, 4-chamber plane. Large subaortic ventricular septal defect is identified (double arrow).

ли корректно диагностированы у 7 пациентов (чувствительность метода 38%). Диагностическая точность ЭХО-КГ в определении праволежащей дуги аорты у детей с тетрадой Фалло составила 82,35% (AUC 66,15%). В определении праволежащей дуги аорты КТ сердца и МРТ сердца имели 100% точность (AUC 1,00) и показали себя как более точные инструменты, чем ЭХО-КГ (p 0,12). У пациента с двойной дугой аорты, диагностированной при проведении КТ сердца (по ЭХО-КГ интерпретирована как праволежащая дуга аорты) была выполнена радикальная коррекция тетрады Фалло с одномоментной перевязкой левой дуги аорты.

Определение наличия aberrантной подключичной артерии.

Среди 85 пациентов у 6 детей по данным контрольных методов (интраоперационные и/или ангиографические данные) была выявлена aberrантная подключичная артерия, из них у 5 – левая aberrантная подключичная артерия, у 1 – правая. Наличие aberrантной подключичной артерии по результатам ЭХО-КГ было корректно определено у 2 пациентов (чувствительность 33%). Показатель диагностической точности ЭХО-КГ в ди-

агностике aberrантной подключичной артерии у детей с тетрадой Фалло составил 94,12% (AUC 66,03%). В определении aberrантной подключичной артерии КТ и МРТ сердца не показали ошибочных результатов (точность обоих методов 100%, AUC 1,00) и имели более высокую эффективность в сравнении с трансторакальной ЭХО-КГ (p 0,50).

У 5 пациентов с праволежащей дугой аорты и левой aberrантной подключичной артерией по данным КТ была выявлена компрессия трахеи, заподозрено неполное сосудистое кольцо, образованное артериальной связкой. Всем пациентам была проведена радикальная коррекция тетрады Фалло, интраоперационная верификация неполного сосудистого кольца с последующим пересечением артериальной связки.

Диагностика дополнительных источников легочного кровоснабжения (большие аорто-легочные коллатеральные артерии, бронхиальные артерии, ОАП).

У 28 пациентов интраоперационно был определен 41 источник дополнительного легочного кровоснабжения в виде больших аортолегочных коллатералей (БАЛКА) и бронхиальных артерий. ЭХО-КГ корректно опре-

дела 8 из них: точность метода 59,2% (AUC 64,3%), чувствительность и специфичность 19,5% и 95,5% соответственно. Основные сложности возникали в диагностике дополнительных источников легочного кровоснабжения небольшого диаметра (1-2 мм) и у детей с гипоплазированной системой ЛА в дифференцировке БАЛКА от ОАП в случае отхождения коллатерали от нисходящего отдела аорты.

Точность КТ сердца в выявлении БАЛКА у пациентов с тетрадой Фалло составила 98,8% (AUC 98,9%). МРТ сердца была проведена у 9 детей с наличием дополнительных источников легочного кровоснабжения: было получено 9 истинно положительных (ИП) результатов, 4 ложноотрицательных (ЛО) результата и 1 ложноположительный (ЛП) результат – диагностическая точность составила 86,1% (AUC 69,1%). При сравнении эффективности КТ сердца и трансторакальной ЭХО-КГ в выявлении дополнительных источников легочного кровоснабжения у пациентов с тетрадой Фалло была определена статистически значимая разница в показателях точности: КТ сердца показала себя более точной методикой ($p=0,001$). МРТ сердца в определении БАЛКА и бронхиальных артерий показала себя более эффективным инструментом в сравнении с ЭХО-КГ, однако статистической разницы в результатах получено не было ($p=0,27$).

У 5 пациентов наличие БАЛКА требовало проведения эмболизации до основного этапа хирургической коррекции тетрады Фалло.

В определении наличия ОАП все три метода: трансторакальная ЭХО-КГ, КТ-сердца и кардио-МРТ имели высокие показатели диагностической точности: 88,24%, 95,83%, 100% соответственно, без статистически значимой разницы в полученных результатах ($p>0,05$).

Оценка особенностей анатомии коронарных артерий (ход и распределение ветвей в выводном отделе ПЖ).

Среди 85 пациентов у 4 детей интраоперационно было выявлено пересечение ВОПЖ одной из коронарных артерий (у 3 – левая коронарная артерия, у 1 – правая коронарная артерия). 3 случая были корректно диагностированы при проведении КТ сердца (чувствительность метода составила 75%), 1 ЛО результат был получен у пациента в возрасте 1 месяца при проведении исследования с ретроспективной ЭКГ-синхронизацией, ЧСС 132 уд/мин. При выполнении ЭХО-КГ корректная диагностика пересечения коронарной артерии ВОПЖ была у двух детей из

4 (чувствительность 50%). Точность ЭХО-КГ и КТ сердца в определении аномального хода коронарных артерий составила 97,61% (AUC 75%) и 98,6% (AUC 87,5%) соответственно. Кардио-МРТ была выполнена у 2 из 4 детей с наличием аномального хода коронарной артерии: в обоих случаях визуализация дистального хода коронарных артерий была затруднительна. Точность кардио-МРТ в определении анатомии коронарных артерий составила 91,67% (AUC 50%). При попарном сравнении диагностической точности, статистически значимой разницы между методиками в определении анатомии коронарных артерий получено не было ($p>0,05$).

У 1 ребенка с наличием пересечения ВОПЖ коронарной артерией по результатам проведенной КТ сердца было принято решение об установке клапанно-содержащего кондуита в ЛА.

Выявление сопутствующих аномалий легочных артерий (кроссинг и атрезия устья одной из ветвей ЛА).

У 14% детей из выборки имелись сочетанные аномалии ЛА: у 9 – кроссинг ЛА и у одного ребенка атрезия левой ЛА с дуктальным ее отхождением. Из 10 детей с аномалиями ЛА 9 были обследованы с помощью КТ сердца: ошибочных результатов получено не было (точность 100%, AUC 1,00). Трансторакальная ЭХО-КГ корректно определила аномалии ЛА у 6 пациентов из 10 (чувствительность 60%). По ЭХО-КГ было получено 3 ЛП и 4 ЛО результата, один из которых был клинически значимым и определен при проведении КТ сердца: атрезия устья левой ЛА (рис. 4). Все пациенты с ошибочными результатами по ЭХО-КГ имели выраженную гипоплазию ствола и ветвей ЛА ($z\ score > -2$). Точность метода составила 93% (AUC 68%). Кардио-МРТ была выполнена у 4 пациентов из 10 с аномалиями ЛА: по результатам МР-исследования был получен 1 ЛО результат у ребенка с резко выраженной гипоплазией системы ЛА, затрудняющей визуализацию пересечения ветвей ЛА. Точность МРТ сердца в определении аномалий ЛА у детей с тетрадой Фалло составила 97,2% (AUC 87,5%). КТ и МРТ показали себя более точными инструментами в определении сочетанных аномалий ЛА у детей с тетрадой Фалло в сравнении с трансторакальной ЭХО-КГ ($p=0,19$).

Диагностика аномалий венозного возврата (частичный аномальный дренаж легочных вен, добавочные верхние полые вены.)

У 12 детей по ангиографическим и/или интраоперационным данным была выявлена сопутствующая патология венозного возврата: у 2 пациентов частичный ано-

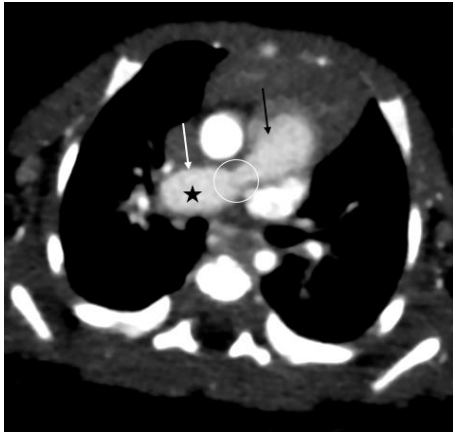


Рис. 4 а (Fig. 4 а)



Рис. 4 б (Fig. 4 б)



Рис. 4 в (Fig. 4 с)



Рис. 4 г (Fig. 4 д)

Рис. 4. КТ сердца в условиях медикаментозной седации, с болюсным контрастированием, без ЭКГ-синхронизации. Пациент А., 6 дней, тетрада Фалло.

а – Артериальная фаза, аксиальная плоскость. От легочного ствола (черная стрелка) отходит единственная правая легочная артерия (белая стрелка). В устье правой легочной артерии – участок локального стеноза (круг), дистальнее которого визуализируется постстенотическое аневризматическое расширение сосуда (звездочка).

б – Артериальная фаза, косо-сагиттальная плоскость. От нисходящей аорты (звездочка) отходит открытый артериальный проток (черная стрелка), продолжающийся в левую легочную артерию (белая стрелка).

в – Режим 3D-реконструкции, вид сбоку. Дуктальное отхождение левой легочной артерии (стрелка).

г – Режим 3D-реконструкции, вид сзади. Устьевой стеноз правой легочной артерии (круг). Постстенотическое аневризматическое расширение правой легочной артерии (звездочка).

Fig. 4. Cardiac CT (medical sedation), contrast enhancement, no ECG-gating. Patient A., 6 days, tetralogy of Fallot.

a – Arterial phase, axial plane. A single right pulmonary artery (white arrow) arises from the pulmonary trunk (black arrow). At the opening of the right pulmonary artery there is an area of local stenosis (circle), distally – a post-stenotic aneurysmal dilatation (asterisk).

b – Arterial phase, oblique plane. From the descending aorta (asterisk) a patent ductus arteriosus (black arrow) arises and continues to the left pulmonary artery (white arrow).

c – 3D reconstruction mode, side view. Ductal origin of the left pulmonary artery (arrow).

d – 3D reconstruction mode, posterior view. Stenosis of the right pulmonary artery (circle). Poststenotic aneurysmal dilatation of the right pulmonary artery (asterisk).

мальный дренаж легочных вен, у 10 – добавочные полые вены. Точность ЭХО-КГ и томографических методик в выявлении сопутствующих аномалий венозного возврата составила 94,12 (AUC 79,12%) и 100% (AUC 1,00) соответственно. По ЭХО-КГ было получено 5 ЛО результатов, один из которых был клинически значимым – пропуск частичного аномального дренажа легочных вен в верхнюю полую вену (ВПВ).

По результатам КТ и/или МРТ сердца хирургическая тактика ведения была изменена у 13 пациентов (15,3%).

Обсуждение.

Современные инструменты кардиовизуализации играют ключевое значение в постановке диагноза тетрада Фалло, в оценке рисков и возможности проведения радикальной коррекции порока. В условиях усовершенствования и высокой доступности инструментов визуализации вопрос целесообразности и безопасности использования того или иного диагностического метода на разных этапах ведения детей с ВПС остается актуальным.

Трансторакальная ЭХО-КГ является инициальным и высокоэффективным инструментом первичной диагностики сложных ВПС с гиповолемией малого круга кровообращения. Существует ряд работ, демонстрирующих широкие возможности трансторакальной ЭХО-КГ, как единственного и окончательного инструмента в предоперационном планировании коррекции сложных ВПС у детей [8, 10]. Однако относительно невысокое пространственное разрешение, зависимость от акустического окна создают объективные сложности в детальной оценке анатомии экстракардиальных структур и выявлении возможных сопутствующих клинически значимых аномалий при проведении ЭХО-КГ у детей с ВПС [9, 12].

Современные алгоритмы ведения детей с тетрадой Фалло включают в себя рутинное проведение трансторакальной ЭХО-КГ и, как правило, дальнейшее дообследование с помощью уточняющих кардиовизуализационных методик: КТ и/или МРТ сердца или прямой АГ [2]. С развитием возможностей неинвазивных методов визуализации сердца рутинное применение прямой ангиографии у детей с тетрадой Фалло является предметом дискуссий: высокая доза ионизирующего излучения, катетер-ассоциированные осложнения и инвазивность являются основными сдерживающими факторами использования методики в диагностических целях [17]. Широкое применение томографических методик обуславливает

изучение их возможностей в предоперационном планировании ВПС и в потенциальной замене прямой ангиографии.

В проведенном исследовании были определены возможности неинвазивных методов кардиовизуализации (ЭХО-КГ, КТ и МРТ сердца) в диагностике и первичном предоперационном планировании коррекции ТФ у детей. Полученные в ходе исследования результаты сопоставлялись с данными прямой ангиографии, интраоперационными данными и данными аутопсии (при наличии).

Точность трансторакальной ЭХО-КГ в постановке диагноза ТФ в нашем исследовании составила 100%, что коррелирует с результатами работ большинства коллег [5, 6, 9]. Снижение диагностической эффективности ЭХО-КГ в предоперационном планировании коррекции тетрады Фалло было в основном за счет низких показателей чувствительности в определении сопутствующих аномалий дуги аорты (праволежащая и двойная дуга), aberrантной подключичной артерии, аномалий легочных артерий и венозного возврата. Частота встречаемости aberrантной подключичной артерии у детей с тетрадой Фалло составляет 5-8% [5]. Сочетанная аномалия в виде праволежащей дуги аорты и aberrантной подключичной артерии при любом ВПС в ряде случаев сопровождается формированием неполного сосудистого кольца, также требующего хирургической коррекции [18, 19].

В проведенном нами исследовании диагностическая точность ЭХО-КГ в определении сопутствующих аномалий дуги аорты составила 82,3%, в определении aberrантной подключичной артерии – 94,12%. Снижение показателей диагностической точности было за счет относительно низкой чувствительности метода (33-37%): среди ЛО результатов было 5 – клинически значимых, требовавших изменения хирургической тактики ведения пациентов. Все сопутствующие аномалии дуги аорты и ее ветвей были корректно диагностированы при проведении КТ сердца (точность метода 100%): неполное сосудистое кольцо было заподозрено у детей с праволежащей дугой аорты и aberrантной левой подключичной артерией по косвенным признакам компрессии трахеи.

Другим важным критерием в предоперационном планировании коррекции тетрады Фалло у детей является определение функционирующего левостороннего ОАП в сочетании с праволежащей дугой аорты, требующего обязательного пересечения, для исключения риска развития сосудистого

кольца и повторной операции в дальнейшем [18]. В определении наличия ОАП все три диагностических метода имели высокие показатели точности: клинически значимые ошибочные результаты по ЭХО-КГ были связаны с трудностями в дифференцировке ОАП от БАЛКА у детей с выраженной гипоплазией системы ЛА. Возможности ЭХО-КГ в определении дополнительных источников легочного кровоснабжения (БАЛКА и бронхиальные артерии) у детей с тетрадой Фалло уступают КТ (пропуск 10 БАЛКА, потребовавших интраоперационного пересечения) [5]. В проведенном нами исследовании диагностическая эффективность ЭХО-КГ статистически значимо уступала КТ и МРТ сердца в определении БАЛКА и бронхиальных артерий ($p=0,001$).

Сопутствующие аномалии коронарных артерий при тетраде Фалло встречаются в 4-6% случаев (72% из них представлены пересечением одной из коронарной артерии (или ее ветвей) ВОПЖ) [18]. Ход коронарных артерий при тетраде Фалло является важным анатомическим параметром, определяющим тактику хирургической коррекции порока: пересечение коронарных артерий ВОПЖ представляет собой одну из причин сложностей выполнения адекватной вентрикулотомии и в ряде случаев является показанием для имплантации легочного кондуита [2]. С появлением УЗ-аппаратов экспертного класса диагностические возможности трансторакальной ЭХО-КГ в оценке коронарных артерий у детей возросли, однако чувствительность метода остается относительно невысокой. КТ сердца также имеет свои ограничения в определении дистального хода коронарных артерий у новорожденных и детей до года из-за высокой ЧСС и выраженности пульсационных артефактов [10, 14]. В нашем исследовании ЛО результат по КТ был получен у ребенка с высокой ЧСС, несмотря на проведение исследования с ретроспективной ЭКГ-синхронизацией.

К редким сочетанным патологиям при тетраде Фалло относится атрезия устья одной из ЛА с аномальным ее отхождением от ОАП или дуги аорты. Наличие аномального отхождения одной из ЛА усложняет и меняет хирургический подход к коррекции основного порока – тетрады Фалло [15]. ОАП, являясь единственным источником кровоснабжения легкого, требует проведения паллиативного этапа коррекции: транслюминальной баллонной ангиопластики с дальнейшей установкой стента. Радикальный этап коррекции ТФ у таких детей включает в себя реимплантацию аномально отходящей ЛА в легочный

ствол, либо формирование бифуркации ЛА с дальнейшей имплантацией в нее клапаносодержащего кондуита. Корректная оценка анатомии ЛА при таких аномалиях методом трансторакальной ЭХО-КГ, как правило, затруднена и комплексная интра- и экстракардиальная анатомия должна дополнительно оцениваться с помощью прямой ангиографии [17]. По полученным результатам в нашем исследовании точность ЭХО-КГ в определении сочетанных аномалий ЛА снижена по сравнению с томографическими методиками, диагностическая эффективность которых не уступает прямой АГ (диагностическая точность 100%).

В определении аномалий венозного возврата метод ЭХО-КГ также имел сниженные показатели чувствительности (60%) и в сравнении с КТ сердца сниженную точность (94% против 100%). У пациентов с гиповолюмией МКК при проведении ЭХО-КГ существует тенденция к недооценке легочных вен и трудности в определении сопутствующих врожденных аномалий венозного возврата (частичный и тотальный аномальный дренаж легочных вен, дефект аорто-легочной перегородки, коронарно-легочная фистула), в ряде случаев требующих одномоментной с основным ВПС коррекции или паллиативного подхода [15, 17].

Заключение.

ЭХО-КГ остается первоочередным эффективным методом в диагностике тетрады Фалло у детей, но не может считаться окончательной предоперационной диагностической методикой, в виду ограничений в оценке сочетанных, хирургически важных, экстракардиальных аномалий.

КТ сердца является высокоэффективным методом в оценке клинически важных сопутствующих анатомических особенностей у пациентов с тетрадой Фалло и может быть окончательным инструментом в планировании хирургической коррекции порока.

МРТ сердца позволяет получить всю необходимую информацию для планирования хирургического лечения тетрады Фалло, однако длительность исследования и продолжительное пребывание пациентов в наркозе требуют строгого обоснования целесообразности применения МРТ при условии отсутствия у ребенка противопоказаний к введению рентгеноконтрастных препаратов и наличия технической возможности выполнения КТ сердца в клинике.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследова-

ния и конфликта интересов, о которых необ-

ходимо сообщить.

Список литературы:

1. Подзолков В.П., Шведунова В.Н. Врожденные пороки сердца. РМЖ. 2001; 10: 430.
2. Клинические рекомендации Министерства здравоохранения Российской Федерации «Тетрада Фалло», 2022.
3. Шаталов К.В., Джиджихия К.М. Влияние ротации трункуса на тип формируемого порока сердца. Часть 1. Отхождение аорты и легочной артерии от правого желудочка. Детские болезни сердца и сосудов. 2021; 4 (18): 168-175. DOI: 10.24022/1810-0686-2021-18-3-168-175
4. Smith CA, McCracken C, Thomas AS, Spector LG, St Louis JD, Oster ME, Moller JH, Kochilas L. Long-term Outcomes of Tetralogy of Fallot: A Study From the Pediatric Cardiac Care Consortium. JAMA Cardiol. 2019; 4 (1): 34-41. doi: 10.1001/jamacardio.2018.4255. PMID: 30566184; PMCID: PMC6439686.
5. Prabhu S, Kasturi S, Mehra S, Tiwari R, Joshi A, John C, Karl TR. The aortic arch in tetralogy of Fallot: types of branching and clinical implications. Cardiol Young. 2020; 30 (8): 1144-1150. doi: 10.1017/S1047951120001705. Epub 2020 Jun 23. PMID: 32638692.
6. Apostolopoulou SC, Manginas A, Kelekis NL, Noutsias M. Cardiovascular imaging approach in pre and postoperative tetralogy of Fallot. BMC Cardiovasc Disord. 2019; 19 (1): 7. doi: 10.1186/s12872-018-0996-9. PMID: 30616556; PMCID: PMC6323806.
7. Бокерия А. А., Подзолков В. П., Глянцев С. П., Кокушенев И. В., Логинова С. В.. История хирургии тетрады Фалло. Часть 1. описание и диагностика порока. подходы к оперативному лечению и начало разработки методов паллиативных операций. Детские болезни сердца и сосудов, 2005.
8. Zühlke L, Lawrenson J, Comitès G, De Decker R, Brooks A, Fourie B, Swanson L, Hugo-Hamman C. Congenital Heart Disease in Low- and Lower-Middle-Income Countries: Current Status and New Opportunities. Curr Cardiol Rep. 2019; 21 (12): 163. doi: 10.1007/s11886-019-1248-z. PMID: 31784844.
9. Shaaban M, Tantaawy S, Elkafrawy F, Haroun D, Romeih S, Elmozy W. Multi-detector computed tomography in the assessment of tetralogy of Fallot patients: is it a must? Egypt Heart J. 2020; 72 (1): 17. doi: 10.1186/s43044-020-00047-3. PMID: 32266511; PMCID: PMC7138870.
10. Sánchez Ramírez CJ, Pérez de Isla L. Tetralogy of Fallot: cardiac imaging evaluation. Ann Transl Med. 2020; 8 (15): 966. doi: 10.21037/atm.2020.02.18. PMID: 32953766; PMCID: PMC7475417.
11. Хасанова К.А., Терновой С.К., Абрамян М.А. Роль трансторакальной ЭХО-КТ, КТ и МРТ сердца в оценке легочных артерий у детей с тетрадой Фалло. REJR. 2023; 13 (3): 39-50. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-3-39-50.
12. Boechat MI, Ratib O, Williams PL, Gomes AS, Child JS, Allada V. Cardiac MR imaging and MR angiography for assessment of complex tetralogy of Fallot and pulmonary atresia. Radiographics. 2005; 25 (6): 1535-46. doi: 10.1148/rg.256045052. PMID: 16284133.
13. Hussain T, Mathur S, Peel SA, Valverde I, Bilska K, Henningsson M, Botnar RM, Simpson J, Greil GF. Coronary artery size and origin imaging in children: a comparative study of MRI and trans-thoracic echocardiography. BMC Med Imaging. 2015; 15: 48. doi: 10.1186/s12880-015-0095-7. PMID: 26502883; PMCID: PMC4623280.
14. Chan FP, Hanneman K. Computed tomography and magnetic resonance imaging in neonates with congenital cardiovascular disease. Semin Ultrasound CT MR. 2015; 36 (2): 146-60. doi: 10.1053/j.sult.2015.01.006. Epub 2015 Feb 3. PMID: 26001944.
15. Sheikh AM, Kazmi U, Syed NH. Variations of pulmonary arteries and other associated defects in Tetralogy of Fallot. Springerplus. 2014; 3: 467. doi: 10.1186/2193-1801-3-467. PMID: 25197621; PMCID: PMC4155051.
16. Кондрашин С.А., Гагарина Н.В. Комплексная лучевая диагностика коарктации аорты у взрослого пациента. REJR. 2013; 13 (1): 75-77.
17. Garg N, Walia R, Neyaz Z, Kumar S. Computed tomographic versus catheterization angiography in tetralogy of Fallot. Asian Cardiovasc Thorac Ann. 2015; 23 (2): 164-75. doi: 10.1177/0218492314538844. Epub 2014 Jun 9. PMID: 24912609.
18. Koppel CJ, Jongbloed MRM, Kiès P, Hazekamp MG, Mertens BJA, Schalij MJ, Vliegen HW. Coronary anomalies in tetralogy of Fallot - A meta-analysis. Int J Cardiol. 2020; 306: 78-85. doi: 10.1016/j.ijcard.2020.02.037. Epub 2020 Feb 17. PMID: 32156463.

References:

1. Podzolkov V.P., Shvedunova V.N. Congenital heart defects. RMJ. 2001; 10: 430 (in Russian).
2. Clinical recommendations of the Ministry of Health of the Russian Federation "Tetralogy of Fallot", 2022 (in Russian).
3. Shatalov K.V., Dzhidzhikhia K.M. The influence of truncus rotation on the type of heart defect formed. Part 1. Origin of the aorta and pulmonary artery from the right ventricle. Children's heart and vascular diseases. 2021; 4 (18): 168-175. DOI: 10.24022/1810-0686-2021-18-3-168-175 (in Russian).
4. Smith CA, McCracken C, Thomas AS, Spector LG, St Louis JD, Oster ME, Moller JH, Kochilas L. Long-term Outcomes of Tetralogy of Fallot: A Study From the Pediatric Cardiac Care Consortium. JAMA Cardiol. 2019; 4 (1): 34-41. doi: 10.1001/jamacardio.2018.4255. PMID: 30566184; PMCID: PMC6439686.
5. Prabhu S, Kasturi S, Mehra S, Tiwari R, Joshi A, John C, Karl TR. The aortic arch in tetralogy of Fallot: types of branching and clinical implications. Cardiol Young. 2020; 30 (8): 1144-1150. doi: 10.1017/S1047951120001705. Epub 2020 Jun 23. PMID: 32638692.
6. Apostolopoulou SC, Manginas A, Kelekis NL, Noutsias M. Cardiovascular imaging approach in pre and postoperative tetralogy of Fallot. BMC Cardiovasc Disord. 2019; 19 (1): 7.

- doi: 10.1186/s12872-018-0996-9. PMID: 30616556; PMCID: PMC6323806.
7. Bockeria L. A., Podzolkov V. P., Glyantsev S. P., Kokshenev I. V., Loginova S. V.. *History of surgery for tetralogy of Fallot. Part 1. description and diagnosis of the defect. approaches to surgical treatment and the beginning of the development of methods of palliative operations. Children's heart and vascular diseases. 2005 (in Russian).*
 8. Zühlke L, Lawrenson J, Comititis G, De Decker R, Brooks A, Fourie B, Swanson L, Hugo-Hamman C. *Congenital Heart Disease in Low- and Lower-Middle-Income Countries: Current Status and New Opportunities. Curr Cardiol Rep. 2019; 21 (12): 163. doi: 10.1007/s11886-019-1248-z. PMID: 31784844.*
 9. Shaaban M, Tantauy S, Elkafrawy F, Haroun D, Romeih S, Elmozy W. *Multi-detector computed tomography in the assessment of tetralogy of Fallot patients: is it a must? Egypt Heart J. 2020; 72 (1): 17. doi: 10.1186/s43044-020-00047-3. PMID: 32266511; PMCID: PMC7138870.*
 10. Sánchez Ramírez CJ, Pérez de Isla L. *Tetralogy of Fallot: cardiac imaging evaluation. Ann Transl Med. 2020; 8 (15): 966. doi: 10.21037/atm.2020.02.18. PMID: 32953766; PMCID: PMC7475417.*
 11. Khasanova K.A., Ternovoy S.K., Abramyan M.A. *Trans-thoracic echocardiography, cardiac CT and MRI in pulmonary arteries assessment in children with tetralogy of fallot. REJR. 2023; 13 (3): 39-50. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-3-39-50 (in Russian).*
 12. Boechat MI, Ratib O, Williams PL, Gomes AS, Child JS, Allada V. *Cardiac MR imaging and MR angiography for assessment of complex tetralogy of Fallot and pulmonary atresia. Radiographics. 2005; 25 (6): 1535-46. doi: 10.1148/rg.256045052. PMID: 16284133.*
 13. Hussain T, Mathur S, Peel SA, Valverde I, Bilska K, Henningsson M, Botnar RM, Simpson J, Greil GF. *Coronary artery size and origin imaging in children: a comparative study of MRI and trans-thoracic echocardiography. BMC Med Imaging. 2015; 15: 48. doi: 10.1186/s12880-015-0095-7. PMID: 26502883; PMCID: PMC4623280.*
 14. Chan FP, Hanneman K. *Computed tomography and magnetic resonance imaging in neonates with congenital cardiovascular disease. Semin Ultrasound CT MR. 2015; 36 (2): 146-60. doi: 10.1053/j.sult.2015.01.006. Epub 2015 Feb 3. PMID: 26001944.*
 15. Sheikh AM, Kazmi U, Syed NH. *Variations of pulmonary arteries and other associated defects in Tetralogy of Fallot. Springerplus. 2014; 3: 467. doi: 10.1186/2193-1801-3-467. PMID: 25197621; PMCID: PMC4155051.*
 16. Kondrashin S.A., Gagarina N.V. *Complex radiological diagnosis of aortic coarctation in an adult patient. REJR. 2013; 13 (1): 75-77 (in Russian).*
 17. Garg N, Walia R, Neyaz Z, Kumar S. *Computed tomographic versus catheterization angiography in tetralogy of Fallot. Asian Cardiovasc Thorac Ann. 2015; 23 (2): 164-75. doi: 10.1177/0218492314538844. Epub 2014 Jun 9. PMID: 24912609.*
 18. Koppel CJ, Jongbloed MRM, Kiès P, Hazekamp MG, Mertens BJA, Schalij MJ, Vliegen HW. *Coronary anomalies in tetralogy of Fallot - A meta-analysis. Int J Cardiol. 2020; 306: 78-85. doi: 10.1016/j.ijcard.2020.02.037. Epub 2020 Feb 17. PMID: 32156463.*