

ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ В ПРЕДОПЕРАЦИОННОЙ ОЦЕНКЕ ОСОБЕННОСТЕЙ АНАТОМИИ ДЕФЕКТА МЕЖЖЕЛУДОЧКОВОЙ ПЕРЕГОРОДКИ И АНОМАЛИИ РАЗВИТИЯ ПРАВОГО ЖЕЛУДОЧКА

Завадовский К.В.¹, Кривошеков Е.В.², Бразовский К.С.³, Лежнев А.А.², Мочула А.В.¹, Шмакова Н.А.², Скофенко И.Н.⁴, Василькова К.Н.⁵, Мишкина А.И.¹, Саушкин В.В.¹, Янулевич О.С.², Федоров В.В.⁶

Приведено клиническое наблюдение ребенка 11-ти месяцев, у которого врожденный дефект межжелудочковой перегородки сочетался с наличием аномальных мышечных тяжей в полости первого желудочка, что приводило к формированию «двухкамерного» правого желудочка и создавало трудности с определением правильной тактики хирургического лечения.

В представленном наблюдении приводятся данные МСКТ сердца с контрастированием, на основании которых была сформирована физическая трехмерная модель сердца, позволившая кардиохирургам выбрать оптимальный доступ и вид коррекции порока. В обсуждении представлены исторические и современные аспекты применения технологии 3D в медицине.

Ключевые слова: МСКТ сердца, дефект межжелудочковой перегородки, дополнительная полость сердца, 3D-печать.

Контактный автор: Завадовский К.В., e-mail: konstzav@gmail.com

Для цитирования: Завадовский К.В., Кривошеков Е.В., Бразовский К.С., Лежнев А.А., Мочула А.В., Шмакова Н.А., Скофенко И.Н., Василькова К.Н., Мишкина А.И., Саушкин В.В., Янулевич О.С., Федоров В.В. Возможности технологии 3d-печати в предоперационной оценке особенностей анатомии дефекта межжелудочковой перегородки и аномалии развития правого желудочка. *REJR* 2018; 8(1):194-201. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-1-194-201.

Статья получена: 29.01.2018

Статья принята: 28.02.2018

1 - НИИ кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр РАН. Лаборатория радионуклидных методов исследования. г. Томск, Россия.
2 - НИИ кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр РАН. Отделение сердечно-сосудистой хирургии. г. Томск, Россия.
3 - ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава РФ. Кафедра медицинской и биологической кибернетики с курсом медицинской информатики. г. Томск, Россия.
4 - ГБУЗ «Детская городская клиническая больница №13 им. Н.Ф. Филатова» ДЗ. г. Москва, Россия.
5 - ГБОУ Лицей №1535. г. Москва, Россия.
6 - Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Научно-производственная лаборатория «Современные производственные технологии» Инженерной школы новых производственных технологий. г. Томск, Россия.

3D PRINTING IN PREOPERATIVE ASSESSMENT OF CARDIAC ANATOMY IN PATIENT WITH CONGENITAL VENTRICULAR SEPTAL DEFECT AND DOUBLE-CHAMBERED RIGHT VENTRICLE

Zavadovsky K.W.¹, Krivoshekov E.V.², Brasovsky K.S.³, Lezhnev A.A.², Mochula A.V.¹, Shmakova N.A.², Skofenko I.N.⁴, Vasilkova K.N.⁵, Mishkina A.I.¹, Saushkin V.V.¹, Yanulevich O.S.², Fedorov V.V.⁶

In this report, the case of 11 months old child is presented. This patient suffered from congenital ventricular septal defect. Moreover, he had double-chambered right ventricle. It determines difficulties in surgical treatment strategy. We presented cardiac MSCT data, which allow creating 3D model of the heart. It allowed choosing optimal surgical treatment tactic. In the discussion, the historical and modern data about abilities of 3D printing in medicine is presented.

Keywords: cardiac MDCT, ventricular septal defect, double-chambered right ventricle, three-dimensional printing

Corresponding author: Zavadovsky K.W., e-mail: konstzav@gmail.com

For citation: Zavadovsky K.W., Krivoshekov E.V., Brasovsky K.S., Lezhnev A.A., Mochula A.V., Shmakova N.A., Skofenko I.N., Vasilkova K.N., Mishkina A.I., Saushkin V.V., Yanulevich O.S., Fedorov V.V. 3D printing in preoperative assessment of cardiac anatomy in patient with congenital ventricular septal defect and double-chambered right ventricle. *REJR* 2018; 8(1):194-201. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-1-194-201.

Received: 29.01.2018

Accepted: 29.02.2018

1 - Nuclear department, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Centre, Russian Academy of Sciences. Tomsk, Russia.
2 - Department of Cardiovascular Surgery, Tomsk National Research Medical Centre, Russian Academy of Sciences. Tomsk, Russia.
3 - Department of Medical and Biological Cybernetics with a Course in Medical Informatics, Siberian State Medical University. Tomsk, Russia.
4 - N.F. Filatov Children's City Clinical Hospital № 13. Moscow, Russia.
5 - Lyceum №1535. Moscow, Russia.
6 - National research Tomsk Polytechnic University. Tomsk, Russia.

Аномальные мышечные тяжи камер сердца, приводящие к формированию дополнительных полостей правого желудочка, – достаточно редкая врожденная аномалия [1]. Данная патология встречается как изолированно, так и в сочетании с различными врожденными пороками сердца, чаще всего с дефектами межжелудочковой перегородки различной локализации [2]. Для выбора последующей тактики хирургического лечения сопутствующих врожденных дефектов важно понимание топографии внутрисердечных структур в условиях аномальной геометрии полости правого желудочка. Важную роль в этом играют современные методы неинвазивной диагностики, которые позволяют получить двух- и трёхмерные модели сердца [3]. В то же время, даже качественные трехмерные модели основных структур сердца не всегда позволяют кардиохирургам определиться с тактикой операции. В этих ситуациях прибегают к созданию физических трёхмерных моделей.

Клиническое наблюдение.

Пациент К., 11 месяцев, в декабре 2016 года в плановом порядке поступил в НИИ кардиологии Томского НИМЦ с диагнозом врожденный порок сердца: дефект межжелудочковой перегородки (ДМЖП).

При поступлении жалобы на потливость,

снижение аппетита, плохую прибавку в весе. Общее состояние ребенка удовлетворительное. При аускультации легких дыхание пуэрильное, проводится по всем отделам, хрипов нет. ЧДД в покое 36 в минуту. Тоны громкие, ритмичные, систолический шум над всей поверхностью сердца. ЧСС 128 в минуту. АД на руке 100/86 мм рт. ст., SpO2 на руках – 82-89%. Пульс на лучевых и бедренных артериях симметричный, удовлетворительного наполнения. Рост 81 см. Вес 9 кг.

Из анамнеза известно, что врожденный порок сердца (ДМЖП) был диагностирован внутриутробно. В периоде новорожденности ребенок перенес острую цитомегаловирусную инфекцию (получал лечение до 2,5 месяцев). В кардиохирургическом отделении по месту жительства 16.03.2016 года ребенку была выполнена операция суживания легочной артерии.

По данным эхокардиографии выявлена дилатация всех камер сердца, кроме левого предсердия. Крупный мышечный среднеапикальный ДМЖП. Надклапанное сужение легочной артерии. Сужение между трабекулярной и отточной частями правого желудочка с формированием дополнительной полости.

Для уточнения анатомии правого желудочка, оценки взаимоотношений между дополнительным мышечным гребнем правого желу-

дочка (ПЖ), который формировал добавочную полость, и выводным трактом ПЖ, а также для оценки топографии и взаимоотношения с указанными структурами дефекта межжелудочковой перегородки, пациенту была выполнена МСКТ сердца с контрастированием.

Параметры сканирования: ретроспективная ЭКГ-синхронизация; напряжение на трубке 80 кВ, сила тока 200-250 мА (с ЭКГ модуляцией), скорость вращения трубки 0,38 с, питч: 0,20:1. Для контрастирования коронарных артерий использовали внутривенную инфузию 13 мл Йопамидола (370 мг йода/мл) (Йопамиро, Врассо, Италия) со скоростью 2 мл/с.

МСКТ сердца: сердце увеличено в размерах за счет правых отделов. Отмечается гипертрофия задней и боковой стенок правого желудочка с наличием гипертрофированного мышечного гребня, идущего от заднебоковой стенки правого желудочка к межжелудочковой перегородке. Толщина мышечного гребня составляет 6 мм. Краниально данный мышечный гребень участвует в формировании задней стенки выводного тракта правого желудочка. Кроме того, имеется второй мышечный гребень, располагающийся справа от трикуспидального клапана, толщина его составляет 8 мм. Каудально данный мышечный гребень соединяется со стенкой правого желудочка. Данные мышечные гребни формируют «дополнительную мышечную полость», имеющую сообщение с правым желудочком и выраженное трабекулярное строение. В апикальном отделе межжелудочковой перегородки определяется дефект, размерами 11x8,8 мм. Правое предсердие деформировано, увеличено в размерах, компримировано описанным выше мышечным гребнем, трикуспидальный клапан расположен типично. Левое предсердие компримировано правым предсердием и смещено влево.

Легочной ствол отходит типично, имеет место надклапанное сужение (состояние после суживания легочной артерии; 5,4x5,1 мм), размеры легочного ствола непосредственно проксимальнее бифуркации – 12,5x11,7 мм. Размеры правой легочной артерии в устье – 10x6,5 мм, левой легочной артерии – 13x11,6 мм.

Коронарные артерии отходят типично. Правая коронарная артерия «зажата» между стенкой правого предсердия и дополнительной камерой правого желудочка.

После проведения МСКТ сердца с контрастированием у кардиохирургов остались вопросы относительно анатомии расположения дефекта межжелудочковой перегородки и доступности через конвенциональные хирургические доступы в межжелудочковой перегородке.

В связи с этим было принято решение о создании физической трехмерной модели сердца данного ребенка.

Для построения трехмерной модели было использовано свободно распространяемое программное обеспечение Slicer 3D версии 4.6 с дополнительными модулями собственной разработки для сегментации исходного изображения [4].

Предварительная обработка данных МСКТ сердца заключалась в выделении области интереса и выравнивании гистограммы по яркости в пределах выделенного участка. После дополнительной ручной коррекции контраста и яркости для получения наилучшего разделения фона и изображения анатомических структур, значения яркости вокселей изображения были преобразованы в формат с двойной точностью (тип double) для дальнейших вычислений.

На первом этапе построения модели была осуществлена сегментация изображения с разделением на отдельные ткани и определение границ. Был применен комбинированный алгоритм сегментации по пороговым значениям логарифма яркости вокселей, совмещенный с методом деформируемых поверхностей для одновременного определения границ с использованием оператора Sobel. Для повышения пространственного разрешения в методе деформируемых поверхностей использована технология субвоксельной интерполяции, при этом интерполированное пространственное разрешение составило 0,25 мм по всем координатам.

Основной проблемой при реконструкции трехмерных моделей на основе МСКТ-изображений является сложная топология внутренней поверхности сердца, что приводит к появлению дефектов поверхности (незамкнутость, появление несуществующих отверстий, слишком тонких стенок и других) и погрешности геометрических размеров. При объемной визуализации это не имеет большого значения, однако для виртуального планирования хирургического вмешательства и трехмерной печати необходимо обеспечить выполнение формальных требований к геометрии внутренних и наружных поверхностей.

Для решения указанной проблемы были применены модули собственной разработки для реализации комбинированного метода сегментации с одновременным выделением границ объектов и субвоксельной интерполяцией обнаруженных границ. В автоматическом режиме было правильно распознано около 95% всей области интереса. Слабо контрастированные области изображения внутри желудочков и вблизи межжелудочковой перегородки были сегментированы вручную.

На основе сегментированного изображения была построена трехмерная модель в виде триангулированной поверхности наружной поверхности и внутренних полостей сердца (рис. 1). Полученная модель была экспортирована в

формате STL для дальнейшей предпечатной подготовки в среде MeshMixer компании Autodesk [5]. Подготовка заключалась в анализе поверхности, заполнении дефектов и последующего снижения размерности (децимации). На этом этапе также проводился анализ модели на предмет ее пригодности к печати расплавленным пластиком (fused deposition modelling, FDM). Важнейшим требованием к предпечатной подготовке является сохранение максимально точной формы поверхностей и формирование зон поддержки участков, не опирающихся на предыдущие слои. Для доступа к внутреннему объему модель была разделена на три части (рис. 2).

Экспериментальным путем были подобраны оптимальные параметры для трехмерной печати: толщина слоя не более 0,1 мм, скорость перемещения экструдера при печати не более 20 мм/с, обязательно охлаждение. Время печати модели составило 18 часов.

На полученной модели удалось детально рассмотреть анатомические особенности инфундибулярного отдела правого желудочка, стала понятна локализация дефекта межжелудочковой перегородки относительно фиброзного кольца трикуспидального клапана и невозможность выполнения пластики ДМЖП доступом через правое предсердие (рис. 3, 4). Стало очевидным, что для выполнения пластики ДМЖП необходимо проведение вентрикулотомии в строго определенном месте.

Такой вид диагностики позволил на дооперационном этапе определиться с хирургической стратегией, тщательно отработать последовательность действий при оперативном вмешательстве и избежать возможных осложнений.

Пациенту выполнена операция: пластика дефекта межжелудочковой перегородки дакроновой заплатой, ушивание дефекта межпредсердной перегородки, миотомия выходного отдела правого желудочка, пластика выходного отдела правого желудочка заплатой Gore-Tex, удаление суживающей тесьмы с легочной артерии в условиях ИК и КХКП. Имплантация противоспаечной заплаты PRECLUDE.

Обсуждение.

История 3D-печати началась в 1983 г., когда Чарльз Халл разработал и запатентовал технологию «стереолитографии» (SLA) для печати 3D-объектов по данным цифровых моделей из фотополимеризующихся композитных материалов. В 1987 году компанией 3D Systems Corp был создан первый стереолитографический аппарат для послойного создания (выращивания) физического объекта по цифровой 3D-модели с помощью особого устройства – 3D-принтера [4]. Впрочем, сам термин «3D-печать» появился только в 1995 году в Массачусетском технологическом институте. Несмотря на большую за-

интересованность научного мира столь ценным изобретением, дальнейшее развитие технологии несколько застопорилось – 3D-принтерам не хватало мощности, они делали всё медленно и неточно, после печати изделия приходилось дорабатывать напильником в прямом смысле этого слова [5].

Широкое распространение технология 3D-печати получила с 2010 года, благодаря значительному снижению цены на 3D-принтеры из-за высокой конкуренции на рынке. С этого времени наблюдается неуклонный рост с тенденцией в сторону снижения цен на принтеры и расходные материалы примерно в 10 раз каждые 2 года. В 2012 году рынок 3D-принтеров составил 2,2 млрд. \$, что на 29% выше 2011 года. К 2016 году рост рынка достиг до 6 блн. \$ (из которых 11% – это медицинское использование) и, по прогнозам агентства Bloomberg, в 2022 году превысит 26 блн. \$ [6, 7].

За последние годы интерес к 3D-печати в медицине увеличивается в геометрической прогрессии. Это заметно и по числу, и по качеству докладов на крупнейших мировых радиологических конгрессах. В докладе руководителя лаборатории 3D-печати Питтсбургского университета д-ра Аниш Годадра, представленном на конгрессе RSNA в 2016 г., сформулированы основные условия получения качественных биомедицинских изделий с использованием технологии 3D-печати. В первую очередь, это получение данных компьютерной томографии высокого качества. При создании 3D-модели важна каждая деталь, поэтому рекомендовано высокое пространственное разрешение детектора и проведение КТ-исследования с толщиной среза менее 1.25 мм. Обработку полученных данных должен проводить опытный врач лучевой диагностики, имеющий глубокое понимание анатомии в данной области. Точная сегментация объекта имеет ключевое значение [8].

Особое место эксперты в области 3D-печати уделяют самообразованию рентгенологов. Специализированные курсы проводятся ежегодно в рамках конгресса RSNA, на базе всемирно известных клиники Мейо и Массачусетского Технологического Университета [9].

Третий этап – создание стереолитографического (STL) файла. Для него необходимо лицензированное медицинское программное обеспечение. Потери анатомических сегментов (что возможно в неспециализированных для медицины программах) не допускаются [10, 11]. Необходимо отметить, что с 2016 года рабочая станция Volume Share 7 позволяет пользователям конвертировать данные DICOM в стереолитографический файл (формат .stl) двумя кликами. Конвертация выполняется с помощью специализированного медицинского програм-

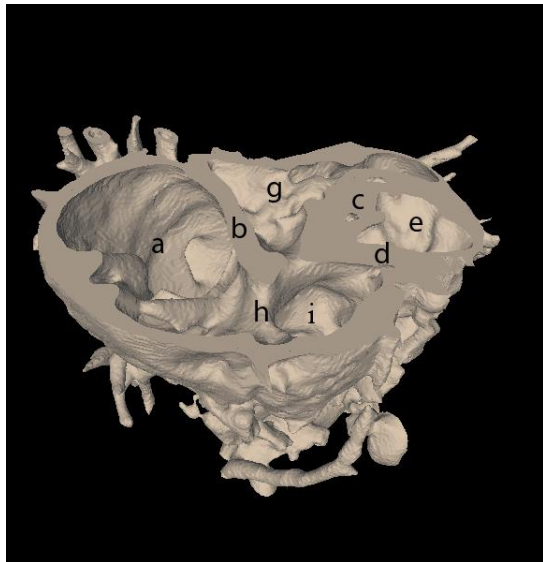


Рис. 1 (Fig. 1)

Рис. 1. 3D-реконструкция сердца.

Триангулированные поверхности после реконструкции.

Fig. 1. 3D heart reconstruction.

Triangulated surfaces after reconstruction.

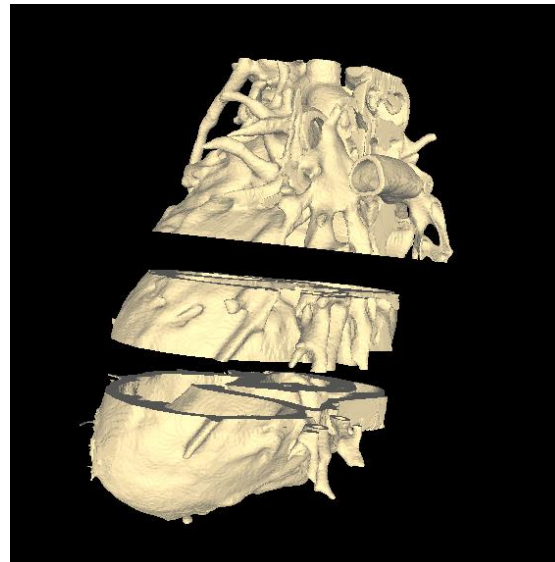


Рис. 2 (Fig. 2)

Рис. 2. 3D-реконструкция.

Модель сердца после предпечатной подготовки.

Fig. 2. 3D heart reconstruction.

Heart model after prepress preparation.



Рис. 3 а (Fig. 3 а)



Рис. 3 б (Fig. 3 в)

Рис. 3. 3D-реконструкция сердца.

а – Поперечный срез 3D-модели сердца на уровне дефекта межжелудочковой перегородки. Визуализируется дополнительная мышечная полость (е) и дефект межжелудочковой перегородки (h).

б – Проекция с наилучшей визуализацией коммуникации (j) между аномальной дополнительной полостью (е) и полостью ПЖ (i). Для наглядности из дополнительной полости через коммуникацию в полость ПЖ введен черный проводник.

Fig. 3. 3D-reconstruction of the heart.

a – Transverse slice of 3D model of the Heart (at the level of ventricular septum). Additional muscular chamber (e) and ventricular septal defect (h) are nicely shown.

b – The projection of 3D heart model with the best visualization of the communication (j) between the anomalous chamber (e) and the right ventricular cavity (i). The black wire is introduced through communication into the right ventricular chamber.

ного обеспечения GE Healthcare и поставляется в составе базовой конфигурации рабочей станции AW.

И, конечно, сама 3D-печать. Правильный выбор 3D-принтера и материала для печати, в зависимости от планируемой области использования [12].

Использование технологии 3D-печати в медицине стало развиваться всего несколько лет назад. Однако технология настолько быстро вошла в ежедневную практику врачей, что в 2017 г. американское управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA) опубликовало официальные рекомендации по производству изделий медицинского назначения с использованием 3D-принтеров, включающие детализированные требования к техническим характеристикам устройств для 3D-печати, процессу их тестирования и требованиям к качеству [13].

Основными направлениями являются стоматология, ортопедия и травматология, а также кардио- и нейрохирургия [14, 15].

3D-модели помогают докторам при планировании хода операции и в оптимизации хи-

рургического процесса, дают возможность в сложных ситуациях избежать возможных осложнений, незаменимы при обучении молодых специалистов [16 - 18].

3D-модели сердца, напечатанные в реальных размерах, служат тренажерами, на которых кардиохирурги отрабатывают этапы операции в каждом сложном и нетипичном случае, и даже могут помочь в подборе донорского сердца в зависимости от веса пациента (что особенно важно в детской кардиохирургии) [19 - 21].

Значительно проще и нагляднее становится общение с пациентом или родителями (в детской хирургии), обсуждение анатомических особенностей врожденного порока сердца (ВПС), либо другой патологии, а также хода операции. Такой подход является шагом к персонализированному лечению каждого пациента [22].

Технологии 3D-печати активно развиваются в России. Новый проект по 3D-печати человеческого сердца стартовал на базе научно-образовательного центра «Современные производственные технологии» Национального иссле-

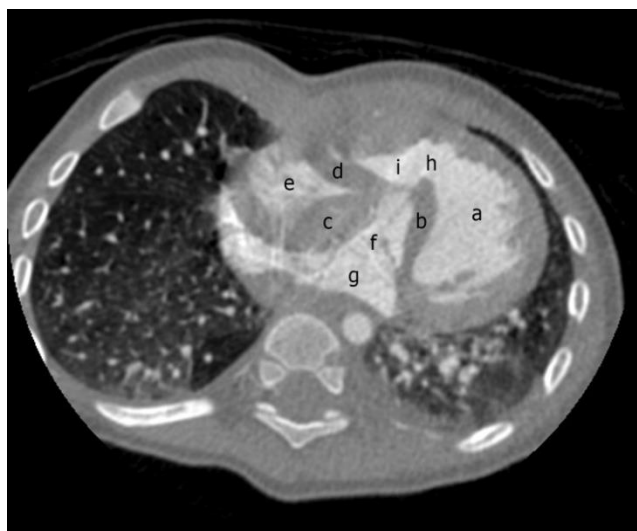


Рис. 4 а (Fig. 4 а)

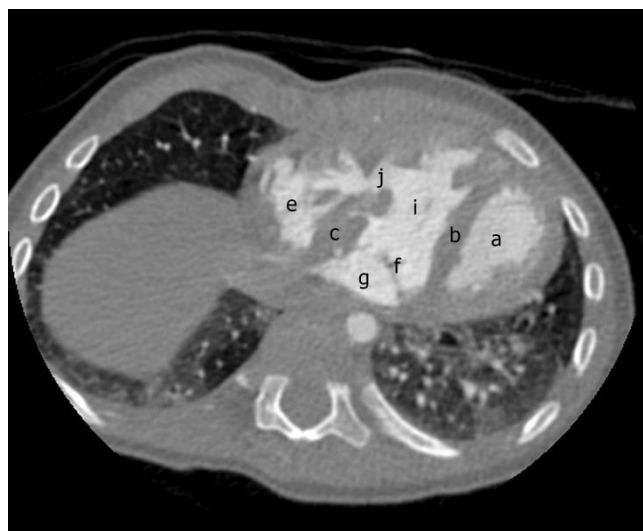


Рис. 4 б (Fig. 4 в)

Рис. 4. МСКТ органов грудной полости. Аксиальная плоскость.

а - поперечный срез на уровне дефекта межжелудочковой перегородки. Визуализируется дополнительная мышечная полость (е) и дефект межжелудочковой перегородки (h).

б - поперечный МСКТ срез на уровне коммуникации между аномальной дополнительной полостью и полостью ПЖ. Визуализируется сообщение (j) между дополнительной мышечной камерой (е) сердца с полостью правого желудочка (i).

Fig. 4. MSCT, heart. Axial slice.

a - transverse cardiac MSCT slice at the level of ventricular septum. Additional muscular chamber (e) and ventricular septal defect (h) are nicely shown.

b - transverse cardiac MSCT slice at the level of the communication between the anomalous chamber and the right ventricular cavity. The communication (j) between the additional right ventricular chamber (e) and the right ventricular cavity (i) is nicely shown.

довательского Томского политехнического университета. Политехники выполняют его для Томского НИИ кардиологии. Сотрудники центра печатают пластиковые копии настоящих сердец на основе данных компьютерной томографии. Имея в руках осязаемую модель, кардиохирурги смогут подробнее изучать дефекты органа и выбирать подходящие способы оперативного лечения. Первые 3D-модели взрослого человеческого сердца были напечатаны учеными ТПУ в конце 2016 года [23].

Заключение.

В данном клиническом наблюдении представлено редкое наблюдение пациента с дефектом межжелудочковой перегородки в сочетании с аномальной дополнительной полостью правого желудочка. Показано, что своевременное вы-

полнение пациенту МСКТ сердца с дальнейшим созданием физической трехмерной модели позволило выбрать наиболее правильную хирургическую тактику для коррекции порока. Более широкое использование технологий 3D-печати в сфере кардиологии и сердечно-сосудистой хирургии будет способствовать лучшей подготовке кадров, лучшему взаимопониманию между врачами и пациентами, а также позволит оптимизировать лечебную тактику.

Источник финансирования и конфликт интересов.

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

Список литературы:

1. Animasahun B.A., Ekure E.N., Njokanta O.F. Double-chambered right ventricle: an uncommon congenital heart disease. Case report and literature review. *Cardiovascular Journal of Africa*. 2011; 22:274–277.
2. Kharwar R.B., Dwivedi S.K., Sharma A. Double-Chambered Right Ventricle with Ventricular Septal Defect and Subaortic Membrane - Three-Dimensional Echocardiographic Evaluation. *Echocardiography*. 2016; 33:323–327.
3. Завадовский К. В., Панькова А. Н. Сцинтиграфическая оценка дисфункции правого желудочка сердца у пациентов с тромбоэмболией легочной артерии. *Медицинская визуализация*. 2009; 3:24-30.
4. Fedorov A., Beichel R., Kalpathy-Cramer J., Finet J., Fillion-Robin J.-C., Pujol S., et al. 3D Slicer as an Image Computing Platform for the Quantitative Imaging Network. *Magnetic Resonance Imaging*. 2012; 30 (9): 1323-1341.
5. Meshmixer is state-of-the-art software for working with triangle meshes (2018). Available at: <https://www.meshmixer.com/> (accessed 29 January 2018).
6. Изобретатель технологии 3D-печати Чарльз Халл номинирован на премию European Inventor Award: [Электронный ресурс] // 3D-принтеры сегодня, 2013-2016. URL: <http://3dtoday.ru/industry/izobretatel-tekhnologii-3d-pechati-charlz-khall-nominirovan-na-premiyu-european-inventor-award.html> (Дата обращения: 29.01.2018).
7. От пиццы до автомобиля: 8 ошеломительных примеров того, что можно напечатать на 3D-принтере: [Электронный ресурс] *Magnis.news*, 2009-2018. URL: <http://www.magnis.news/rus/news/8933/> (Дата обращения: 29.01.2018).
8. Wohlers 2017 Report on 3D Printing Industry Points to Softened Growth (2017). Available at: <http://www.rapidreadytech.com/2017/04/wohlers-2017-report-on-3d-printing-industry-points-to-softened-growth/> (accessed 29 January 2018).
9. GE Keeps Its Checkbook Handy After All-in Bet on 3-D Printing (2017). Available at: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-04-20/ge-keeps-its-checkbook-handy-after-all-in-bet-on-3-d-printing> (accessed 29 January 2018).
10. Tips for implementing 3D printing at your hospital (2015). Available at: <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&pag=dis&ItemID=112380> (accessed 29 January 2018).
11. How radiologists can optimize their role in 3D printing (2017). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&pag=dis&ItemID=118441> (accessed 29 January 2018).
12. The power and promise of 3D printing: Part 1 (2016). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&pag=dis&ItemID=113863> (accessed 29 January 2018).
13. The power and promise of 3D printing: Part 2 (2016). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&pag=dis&ItemID=113881> (accessed 29 January 2018).
14. 4 steps to high-quality 3D printing for radiology (2016). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&pag=dis&ItemID=116130> (accessed 29 January 2018).
15. FDA releases guidance on 3D printing of medical products (2017). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&pag=dis&ItemID=119319> (accessed 29 January 2018).
16. 3D-printed model helps prepare for stroke clot removal (2017). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&pag=dis&ItemID=118424> (accessed 29 January 2018).
17. Решетов И.В., Святославов Д.С., Кудрин К.Г., Дуб В.А., П.А. Медведев. Технологическое обеспечение аддитивных технологий для реконструкции лицевого скелета. *REJR* 2017; 7 (4): 140-153. DOI:10.21569/2222-7415-2017-7-4-140-153.
18. 3D printing shortens hip surgery times, lowers costs (2017). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&pag=dis&ItemID=118004> (accessed 29 January 2018).
19. The power and promise of 3D printing: Part 1 (2016). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&pag=dis&ItemID=113863> (accessed 29 January 2018).
20. Researchers launch library of 3D heart models (2016). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&pag=dis&ItemID=103158> (accessed 29 January 2018).
21. 3D models put pediatric hearts in surgeons' hands (2015).

<http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=mri&ag=dis&ItemID=111955> (accessed 29 January 2018).

22. Funding, expertise give Jump an edge on 3D hearts (2016). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=115267> (accessed 29 January 2018).

23. 3D images aid selection of heart transplant donors (2015). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=112641> (accessed 29 January 2018).

24. Anwar S, Singh GK, Varughese J, Nguyen H, Billadello JJ, Sheybani EF, et al. 3D Printing in Complex Congenital Heart

References:

1. Animasahun B.A., Ekure E.N., Njokanma O.F. Double-chambered right ventricle: an uncommon congenital heart disease. Case report and literature review. *Cardiovascular Journal of Africa*. 2011; 22:274–277.

2. Kharwar R.B., Dwivedi S.K., Sharma A. Double-Chambered Right Ventricle with Ventricular Septal Defect and Subaortic Membrane— Three-Dimensional Echocardiographic Evaluation. *Echocardiography*. 2016; 33:323–327.

3. Pankova A.N., Zavadovsky K.V. Estimation of Dysfunction of the Hearts's Right Ventricle at Patients with Pulmonary Embolism by Scintigraphy. *Medicinskaya vizualizaciya*. 2009; 3:24-30 (in Russian).

4. Fedorov A., Beichel R., Kalpathy-Cramer J., Finet J., Fillion-Robin J-C., Pujol S., et al. 3D Slicer as an Image Computing Platform for the Quantitative Imaging Network. *Magnetic Resonance Imaging*. 2012; 30 (9): 1323-1341.

5. Meshmixer is state-of-the-art software for working with triangle meshes (2018). Available at: <https://www.meshmixer.com/> (accessed 29 January 2018).

6. Inventor of 3D printing technology Charles Hull is nominated for the European Inventor Award (2014). Available at: <http://3dtoday.ru/industry/izobretatel-tekhnologii-3d-pechati-charlz-khall-nominirovan-na-premiyu-european-inventor-award.html> (accessed 29 January 2018) (in Russian).

7. From pizza to car: 8 stunning examples of what you can print on a 3D printer (2016). Available at: <http://www.magnis.news/rus/news/8933/> (accessed 29 January 2018) (in Russian).

8. Wohlers 2017 Report on 3D Printing Industry Points to Softened Growth (2017). Available at: <http://www.rapidreadytech.com/2017/04/wohlers-2017-report-on-3d-printing-industry-points-to-softened-growth/> (accessed 29 January 2018).

9. GE Keeps Its Checkbook Handy After All-in Bet on 3-D Printing (2017). Available at: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-04-20/ge-keeps-its-checkbook-handy-after-all-in-bet-on-3-d-printing> (accessed 29 January 2018).

10. Tips for implementing 3D printing at your hospital (2015). Available at: <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=112380> (accessed 29 January 2018).

11. How radiologists can optimize their role in 3D printing (2017). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=118441> (accessed 29 January 2018).

12. The power and promise of 3D printing: Part 1 (2016). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=113863> (accessed 29 January 2018).

Disease: Across a Spectrum of Age, Pathology, and Imaging Techniques. *JACC Cardiovascular Imaging*. 2017; 10(8):953-956. doi: 10.1016/j.jcmg.2016.03.013.

25. Томские ученые печатают 3D-модели детских сердец для кардиохирургии: [Электронный ресурс] // 3Dpulse.ru, 2014-2018. URL: <http://www.3dpulse.ru/news/meditsina/tomskie-uchenye-pechatayut-3d-modeli-detskih-serdets-dlya-kardiohirurgii/> (Дата обращения: 29.01.2018).

<http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=113881> (accessed 29 January 2018).

13. The power and promise of 3D printing: Part 2 (2016). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=116130> (accessed 29 January 2018).

14. 4 steps to high-quality 3D printing for radiology (2016). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=119319> (accessed 29 January 2018).

15. FDA releases guidance on 3D printing of medical products (2017). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=118424> (accessed 29 January 2018).

16. 3D-printed model helps prepare for stroke clot removal (2017). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=118004> (accessed 29 January 2018).

17. Reshetov I.V., Svyatoslavov D.S., Kudrin K.G., Dub V.A., Medvedev P.A. Technological supply of additive technologies for face skeleton reconstruction. *REJR* 2017.7(4):140-153. DOI:10.21569/2222-7415-2017-7-4-140-153 (In Russian).

18. 3D printing shortens hip surgery times, lowers costs (2017). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=113863> (accessed 29 January 2018).

19. The power and promise of 3D printing: Part 1 (2016). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=103158> (accessed 29 January 2018).

20. Researchers launch library of 3D heart models (2016). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=111955> (accessed 29 January 2018).

21. 3D models put pediatric hearts in surgeons' hands (2015). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=112641> (accessed 29 January 2018).

22. Funding, expertise give Jump an edge on 3D hearts (2016). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=118441> (accessed 29 January 2018).

23. 3D images aid selection of heart transplant donors (2015). <http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=sup&sub=adv&ag=dis&ItemID=112641> (accessed 29 January 2018).

24. Anwar S, Singh GK, Varughese J, Nguyen H, Billadello JJ, Sheybani EF, et al. 3D Printing in Complex Congenital Heart Disease: Across a Spectrum of Age, Pathology, and Imaging Techniques. *JACC Cardiovascular Imaging*. 2017; 10 (8): 953-956. doi: 10.1016/j.jcmg.2016.03.013.

25. Tomsk scientists print 3D models of children's hearts for cardiac surgery (2017). <http://www.3dpulse.ru/news/meditsina/tomskie-uchenye-pechatayut-3d-modeli-detskih-serdets-dlya-kardiohirurgii/> (accessed 29 January 2018).