

# Создание 3D-модели сердца на основе данных магнитно-резонансной томографии у пациента с постинфарктной аневризмой левого желудочка (обзор литературы с собственным клиническим наблюдением)

С. В. Кушнарёв<sup>\*,1</sup>, И. С. Железняк<sup>1</sup>, В. Н. Кравчук<sup>1,2</sup>, С. Д. Рудь<sup>1</sup>,  
А. В. Ширшин<sup>1</sup>, Е. А. Князев<sup>1</sup>, И. А. Меньков<sup>1</sup>, Г. Г. Романов<sup>1</sup>

1 ФГБ ВОУ ВО «Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова» Минобороны России, Санкт-Петербург

2 ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова» Минздрава России, Санкт-Петербург

## Creation of a 3D Model of the Heart on the Basis of Data of Magnetic Resonant Tomography in a Patient with Postinfarct Aneurysm of the Left Ventricle (Literature Review and Own Observations)

S. V. Kushnarev<sup>\*,1</sup>, I. S. Zheleznyak<sup>1</sup>, V. N. Kravchuk<sup>1,2</sup>, S. D. Rud<sup>1</sup>,  
A. V. Shirshin<sup>1</sup>, E. A. Knyazev<sup>1</sup>, I. A. Menkov<sup>1</sup>, G. G. Romanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> S. M. Kirov Military Medical Academy, Ministry of Defense of Russia, Saint Petersburg

<sup>2</sup> North-West State Medical University named after I. I. Mechnikov, Ministry of Healthcare of Russia, Saint Petersburg

### Реферат

В статье представлен клинический случай создания и предоперационного планирования хирургического пособия на персонифицированной бивентрикулярной 3D-модели сердца. Разработана методика МР-сканирования пациента и получения DICOM-изображений, пригодных для создания 3D-модели. Также описаны алгоритмы сегментации МР-изображений, получения цифровой 3D-модели, ее обработка и подготовка к печати на принтере.

**\* Кушнарёв Сергей Владимирович**, врач-рентгенолог, адъюнкт кафедры рентгенологии и радиологии с курсом ультразвуковой диагностики Военно-медицинской академии Минобороны России, Санкт-Петербург.

Адрес: 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6.  
Тел.: +7 (812) 292-33-47. Электронная почта: s.v.kushnarev@yandex.ru  
ORCID.org/0000-0003-2841-2990

**Kushnarev Sergey Vladimirovich**, Radiologist, Adjunct of Department of Roentgenology and Radiology with a Course of Ultrasound Diagnostics, S. M. Kirov Military Medical Academy, Ministry of Defense of Russia, St. Petersburg.

Address: 6, ul. Academica Lebedeva, St. Petersburg, 194044, Russia.  
Phone number: +7 (812) 292-33-47. E-mail: s.v.kushnarev@yandex.ru  
ORCID.org/0000-0003-2841-2990

Полученная бивентрикулярная 3D-модель сердца использовалась врачебной командой для выбора способа пластики, планирования этапов хирургического вмешательства и отработки соответствующих навыков. Пациенту были выполнены аортокоронарное шунтирование и резекция аневризмы левого желудочка в условиях искусственного кровообращения. Общее время операции составило 3 ч 40 мин, время искусственного кровообращения — 92 мин, время пережатия аорты — 66 мин. Патологические изменения изготовленной 3D-модели визуально совпали с интраоперационными результатами.

**Ключевые слова:** магнитно-резонансная томография, постинфарктная аневризма левого желудочка, 3D-модель сердца, предоперационное планирование, сегментация.

## Abstract

The article presents a clinical case of the creation and preoperative planning of a surgical manual on a personified biventricular 3D model of the heart. A technique has been developed for MR scanning of a patient and obtaining DICOM images suitable for creating a 3D model. Algorithms for segmentation of MR images, obtaining a digital 3D model, its processing and preparation for printing on a printer are also described.

The obtained biventricular 3D model of the heart was used by the medical team to select the method of plastic surgery, to plan the stages of surgical intervention and to develop appropriate skills. The patient underwent coronary artery bypass grafting and resection of the left ventricular aneurysm under cardiopulmonary bypass. The total operation time was 3 hours 40 minutes, cardiopulmonary bypass — 92 minutes, aortic clamping time — 66 minutes. Pathological changes in the manufactured 3D model visually coincided with intraoperative results.

On the basis of MR images it is possible to create 3D model of the heart in patients with post-infarction left ventricular aneurysm for preoperative plastic surgery planning.

**Key words:** Magnetic Resonance Imaging, Postinfarction left Ventricular Aneurysm, 3D Model of the Heart, Preoperative Planning, Segmentation.

## Актуальность

За последнее десятилетие эффективность оказания неотложной помощи пациентам с острой сердечной патологией была существенно улучшена. С внедрением современных медикаментозных средств и рентгенэндоваскулярных методов реваскуляризации миокарда в острейшем периоде повысился процент выживших после обширных трансмуральных инфарктов миокарда [6, 11]. Тем не менее, по данным Всемирной организации здравоохранения, патология сердечно-сосудистой системы оставляет за собой лидирующие позиции в причинах смертности. При этом 80 % из них приходится на ишемическую болезнь сердца, артериальную гипертензию и цереброваскулярные болезни [10].

Постинфарктная аневризма левого желудочка (ПАЛЖ) относится к тяжелым осложнениям инфаркта миокарда, частота ее возникновения варьирует от 10 до 35 % [17]. По данным мультицентрового исследования CASS (Coronary Artery Surgery Study) при проведении коронаровентрикулографии у 7,6 % больных выявляется постинфарктная аневризма левого желудочка [20]. Формирование ПАЛЖ приводит к выраженному снижению функциональных показателей левого желудочка и формированию хронической сердечной недостаточности. Как следствие у таких пациентов стремительно ухудшается качество жизни и снижается трудоспособность [7]. Стоит отметить, что в совре-

менной литературе описано достаточное количество клинических случаев возникновения данной патологии не только у пожилых пациентов, но и у более молодых пациентов, без признаков поражения коронарных артерий [1, 8].

Хроническая сердечная недостаточность (ХСН), обусловленная развитием ПАЛЖ, рефрактерна к консервативным методам лечения. При медикаментозном лечении больных с наличием ПАЛЖ пятилетняя выживаемость составляет от 47 до 70 %. Основной причиной смерти выступают желудочковые нарушения ритма — почти в 50 % случаев, на долю прогрессирования сердечной недостаточности приходится 33 %, повторного инфаркта миокарда — 11 %, некардиальных причин — 22 % [2, 15, 16, 18, 19]. Таким образом, хирургические методы остаются ведущими в коррекции ХСН вследствие формирования ПАЛЖ.

На сегодняшний день существует несколько основных видов операций, выполняемых на левом желудочке, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки [13]. Максимально точное определение размеров аневризмы, выявление тромбоза полости левого желудочка являются важными диагностическими критериями в планировании кардиохирургического пособия. Эти данные должны быть получены как можно раньше на этапе предоперационного обследования [4]. В настоящее время нет четкой концепции принятия решения о том или ином виде пластики до оперативного вмешательства. Как следствие вопросы предоперационного моделирования и выбора способа пластики ПАЛЖ остаются нерешенными [12]. Чаще всего хирургическая команда принимает решение об объеме оперативного вмешательства не-

посредственно при его выполнении после визуальной оценки патологических изменений миокарда. При этом точная интраоперационная оценка распространения рубцовых изменений миокарда не всегда возможна. Следовательно, предоперационное моделирование патологических изменений может быть использовано в качестве дополнительного диагностического инструмента.

Создание точной копии оперируемого органа позволит определить особенности его строения и топографии [3]. Несмотря на имеющиеся в настоящее время способы трехмерного моделирования, большинство оперативных вмешательств по-прежнему планируются с использованием изображений, просматриваемых на экранах, и как следствие роль 3D-модели в повседневной клинической практике еще предстоит определить [25].

**Цель:** разработать методику создания 3D-модели сердца на основе данных магнитно-резонансной томографии у пациентов с ПАЛЖ для последующего планирования этапов хирургического лечения.

### **Клинический случай**

Пациент Б., 71 год, перенес обширный трансмуральный инфаркт миокарда в декабре 2018 г. Терапевтическое лечение (системный тромболитический) не оказало положительного эффекта, и у пациента произошел рецидив, по поводу которого была выполнена коронарография со стентированием передней межжелудочковой артерии. Несмотря на проведенное рентгеноэндоваскулярное лечение, основное заболевание осложнилось развитием ПАЛЖ с формированием пристеночных тромботических масс. Учитывая характер выявленных пато-

логических изменений, пациенту было показано оперативное лечение после стабилизации состояния. До кардиохирургического вмешательства, в период с января по март 2019 г. у пациента развились следующие осложнения: синдром Дресслера с тампонадой сердца; фибрилляция предсердий (параксизмальная форма), которые были купированы феноэстрацией и дренированием полости перикарда, электроимпульсной терапией соответственно.

В конце марта 2019 г. состояние пациента стабилизировалось, в связи с чем он был госпитализирован в 1-ю клинику (хирургии усовершенствования врачей) им. П. А. Куприянова Военно-медицинской академии им. С. М. Кирова.

Процесс изготовления 3D-модели состоял из 3 основных этапов. Первый — получение постконтрастных МР-изображений фиброзных изменений сердца с высоким пространственным разрешением. Второй — сегментация и получение цифрового прототипа 3D-модели сердца с последующей подготовкой ее к печати. Третий, заключительный, — непосредственная печать и обработка 3D-модели.

В предоперационном периоде пациенту было выполнено сканирование сердца на магнитно-резонансном томографе Philips Ingenia с индукцией магнитного поля 1,5 Тл (Philips Medical Systems Nederland B.V., Нидерланды). Исследование выполняли в положении лежа на спине. Сканирование осуществлялось с использованием поверхностной 16-канальной катушки и было синхронизировано с сердечным ритмом и пульсовой волной. Во время сбора данных нарушений сердечного ритма зарегистрировано не было, частота пульса не превышала 80 ударов в минуту. Общая продолжительность процедуры составила 71 мин.

Основными задачами МР-сканирования были: верификация диагноза; точный расчет функциональных показателей левого и правого желудочков; определение участков жизнеспособного миокарда и распространения фиброзных изменений, а также получение специальной серии DICOM-изображений, пригодных для изготовления 3D-модели. Для одномоментного решения этих задач нами был разработан специальный протокол сканирования (табл.).

В дополнение к стандартным импульсным последовательностям в протокол была добавлена специальная постконтрастная 3D-фазочувствительная импульсная последовательность «инверсия — восстановление» на основе сверхбыстрого градиентного эха — 3D\_PSIR\_TFE. Также для оптимизации проведения исследования и сокращения времени сканирования были исключены T1- и T2-импульсные последовательности на основе турбоспинового эха с черной кровью. Данные импульсные последовательности используются для определения расчета индексов отека и гиперемии миокарда и как следствие применяются при «острых» заболеваниях миокарда, таких, как миокардит, инфаркт миокарда (острейшая и острая стадии) и т. д.

После локалайзера (SURVEY) получали киноизображения (sBTFE) в 2-камерной проекции по короткой оси, 2- 3- и 4-камерной проекциях по длинной оси (рис. 1, а — в). В дальнейшем их использовали для визуальной оценки сократимости миокарда желудочков и расчета основных функциональных показателей.

Для выявления фиброзных изменений выполняли отсроченное сканирование через 15 мин после вну-

Разработанный протокол сканирования

Импульсная последовательность	Количество срезов	Толщина среза, мм
SURVEY	60	10
Кинопоследовательности		
sBTFE_BH (2-камерная по длинной оси)	1	8
sBTFE_BH (4-камерная)	1	8
sBTFE_BH (3-камерная)	1	8
sBTFE_BH (2-камерная по короткой оси)	12 – 14	8
T2_TSE_Black blood	Исключена из протокола	
T1_TSE_Black blood	Исключена из протокола	
Постконтрастное сканирование		
T1_TSE_Black blood	Исключена из протокола	
IR_TFE_LL (LockLoker)	1	8
2D_IR_TFE	5	8
3D_PSIR_TFE	90	3 (с интерполяцией 1,5 мм)

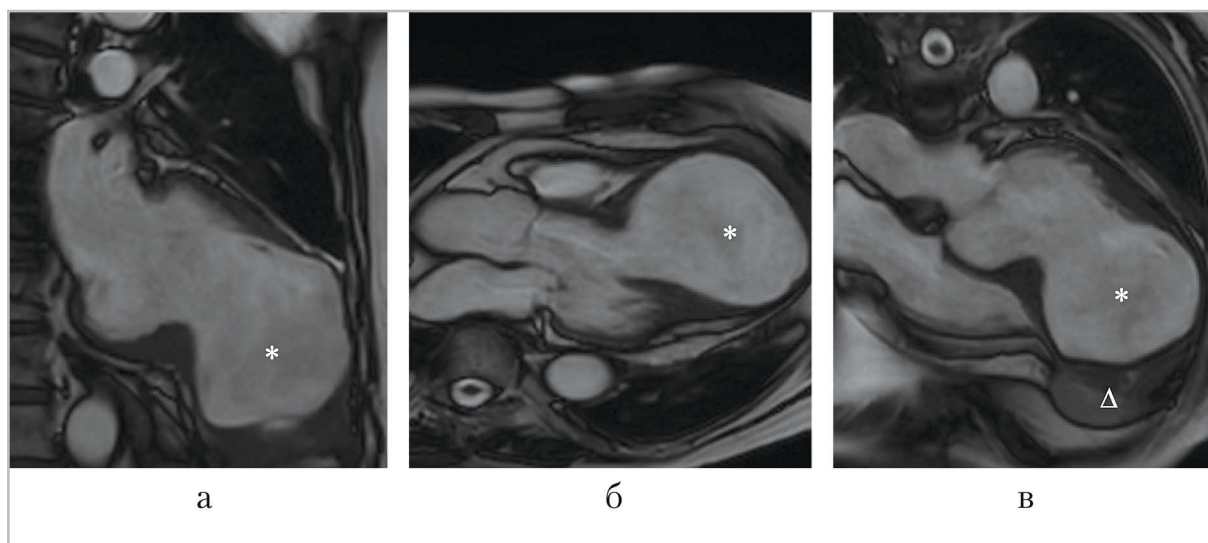


Рис. 1. Кинопоследовательности по длинной оси: а – 2-камерная проекция; б – 3-камерная проекция; в – 4-камерная проекция. Визуализируется «гигантская» постинфарктная аневризма левого желудочка (звездочка), с пристеночными тромботическими массами (треугольник) и истончением стенки до 2–3 мм

тривенного введения парамагнитного контрастного препарата, предварительно определив нулевое время инверсии от здорового миокарда. Дозировка контрастного вещества составила 18 мл из

расчета 0,15 ммоль/кг массы тела пациента. Для определения нулевого времени инверсии от здорового миокарда использовали специальную импульсную последовательность – LockLocker (IR\_

TFE\_LL). Для выявления фиброзных изменений использовали стандартную 2D-импульсную последовательность «инверсия — восстановление» на основе сверхбыстрого градиентного эха — 2D\_IR\_TFE, толщина среза которой составляла 8 мм, количество срезов — 5. Все перечисленные импульсные последовательности применяли на задержке дыхания, которая составляла от 14 до 23 с.

В завершение МР-исследования сканировали все сердце по длинной оси с помощью специальной 3D-фазочувствительной импульсной последовательности «инверсия — восстановление» на основе сверхбыстрого градиентного эха — 3D\_PSIR\_TFE. Целью данной импульсной последовательности являлось получение DICOM-изображений фиброзных изменений всего сердца с высоким пространственным разрешением и истинной толщиной среза 3 мм. Во время сбора данных осуществлялась

50 %-ная интерполяция срезов, что позволило получить толщину среза 1,5 мм и в дальнейшем выполнить мультипланарную реконструкцию хорошего качества для более детальной сегментации (рис. 2, а). Сканирование выполняли на свободном дыхании с использованием навигатора для отслеживания положения купола диафрагмы. Сбор данных осуществлялся на высоте выдоха в позднюю диастолу желудочков. Время сканирования на данном этапе составило около 17 мин, количество полученных срезов — 90.

Полученные МР-изображения оценивали 2 врача-рентгенолога, опыт работы которых в рентгенологии составлял 19 и 8 лет, в исследовании МРТ сердца — 10 и 2 года соответственно. Для пространственного определения положения и размеров выявленных фиброзных изменений использовали 17-сегментарную модель, рекомендованную Американской ассоциацией кардиологов.

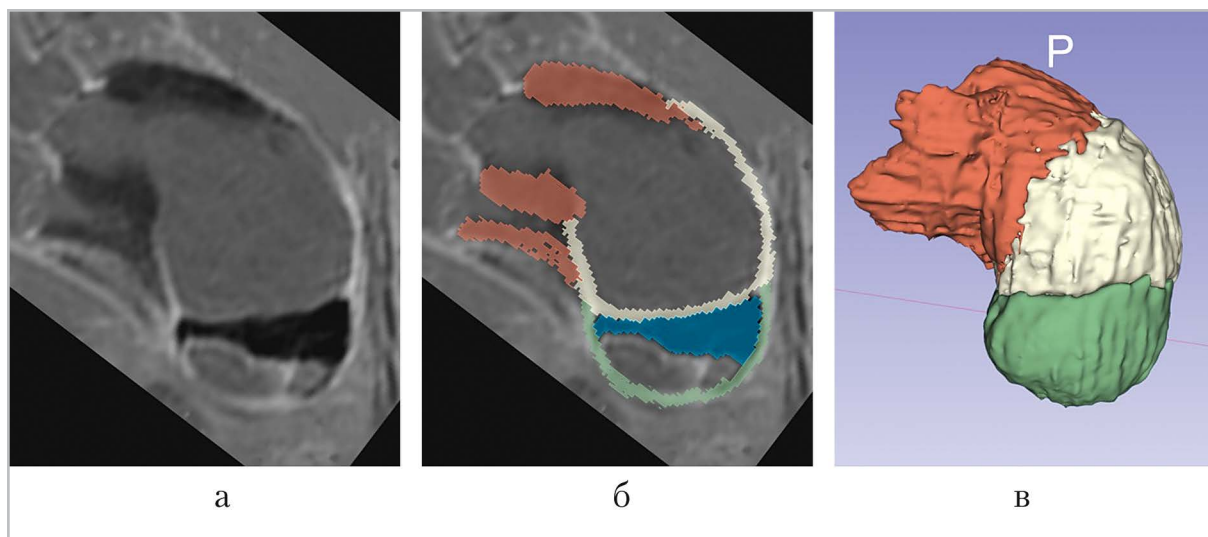


Рис. 2. Процесс сегментации постконтрастных изображений, полученных с помощью 3D\_PSIR-TFE импульсной последовательности: а — мультипланарная реконструкция постконтрастных изображений; б — сегментация — выделение областей интереса различным цветом на каждом срезе; в — цифровая 3D-модель в формате STL, полученная в результате соединения областей интереса из каждого среза

По результатам выполненной МРТ у пациента была подтверждена «гигантская» тромбированная ПАЛЖ. Толщина стенки аневризмы в области верхушки не превышала 2–3 мм. Определялась дилатация левого желудочка с выраженным снижением его глобальной функции, недостаточность аортального (0–1-й ст.), митрального (1-й ст.) и трикуспидального (1-й ст.) клапанов. По критерию распространенности фиброзных изменений миокард в S7, S8, S13, S14, S15, S16, S17 был нежизнеспособен. После обсчета функциональные показатели левого желудочка были следующими: конечно-систолический объем — 227 мл; конечно-диастолический объем — 322 мл; фракция выброса — 16 %. Функциональные показатели правого желудочка были в пределах нормальных значений, характерных для данного пола и возраста [22].

На втором этапе осуществлялась сегментация постконтрастных DICOM-изображений, полученных с помощью импульсной последовательности, — 3D\_PSIR\_TFE. Сегментацию выполняли с использованием открытого программного обеспечения 3D Slicer комбинацией метода порогового отсечения значений и ручной корректировки оператором. На каждом срезе выделялись следующие зоны интереса: красным — не поврежденный миокард, белым — фиброзная ткань, синим — тромботические массы, зеленым — область аневризмы выше тромботических масс. Далее, после сегментации всех срезов, выделенные области интереса соединялись между собой, в результате чего получили цифровую 3D-модель в формате STL (Stereolithography) (рис. 2, *a – в*). Общее время создание виртуальной 3D-модели составило 5 ч.

Полученную цифровую 3D-модель предварительно подготавливали к печати на 3D-принтере в программе Meshmixer (Autodesk, USA), используя инструменты сглаживания, выравнивания и наращивания областей (рис. 3, *a – в*).

Завершением второго этапа являлась генерация набора команд для 3D-принтера (G-code) в программном пакете Cura (Ultimaker, США).

На третьем, последнем этапе выполнялась печать 3D-модели с использованием метода послойного наплавления FFF (FDM). Данная технология печати позволяет создавать трехмерные физические объекты путем послойного добавления расплавленной полимерной нити. Печать производилась на двухэкструдерном принтере (FL Sun, Китай). Так как модель состояла из 4 частей, сначала одномоментно напечатали здоровый миокард и фиброзные изменения (красным и белым цветом). Далее отдельно напечатали материалом синего цвета тромботические массы, бесцветным материалом — купол аневризмы, который расположен выше тромба (рис. 4, *a – в*).

Особенностью изготовленной модели была не только многоцветность, но и эластичность (твердость используемого материала соответствовала 60 единицам по шкале Шор А, что приблизительно соответствует эластичности канцелярского ластика). Общее время печати всех элементов модели составило около 30 ч. После изготовления 3D-модели поддержки удалялись механическим и термическим способами.

Полученная 3D-модель сердца использовалась хирургической бригадой для выбора способа пластики, планирования и отработки этапов оперативного вмешательства. 29 марта 2019 г. пациен-

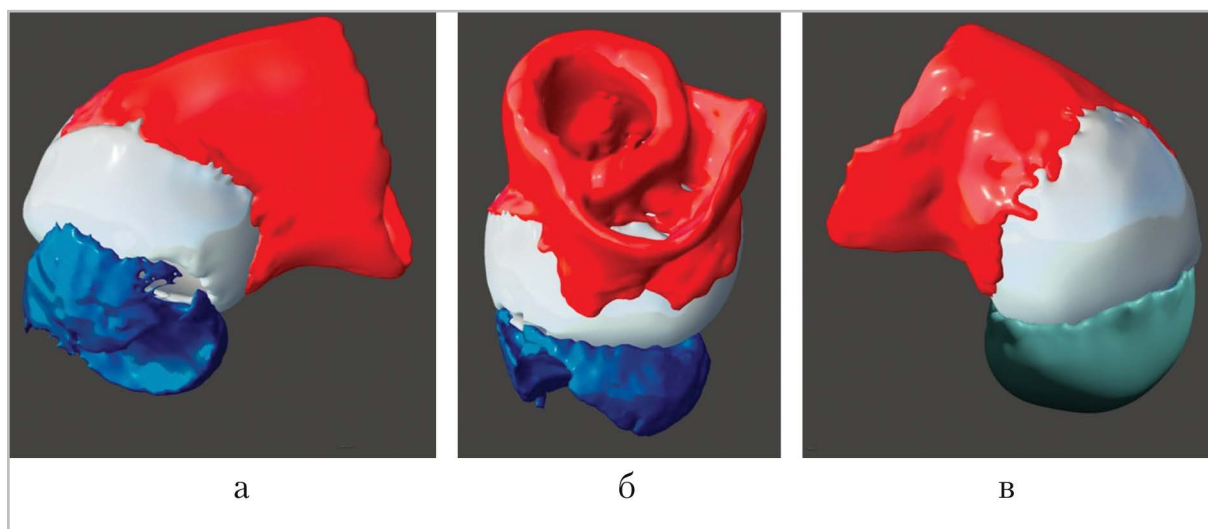


Рис. 3. Подготовленная к печати цифровая 3D-модель сердца: *а* — вид модели со стороны латеральной стенки левого желудочка без части аневризмы, расположенной выше тромботических масс, и с визуализацией дефекта сообщения полостей; *б* — вид со стороны основания желудочков без части аневризмы, расположенной выше тромботических масс; *в* — вид модели со стороны свободной стенки правого желудочка

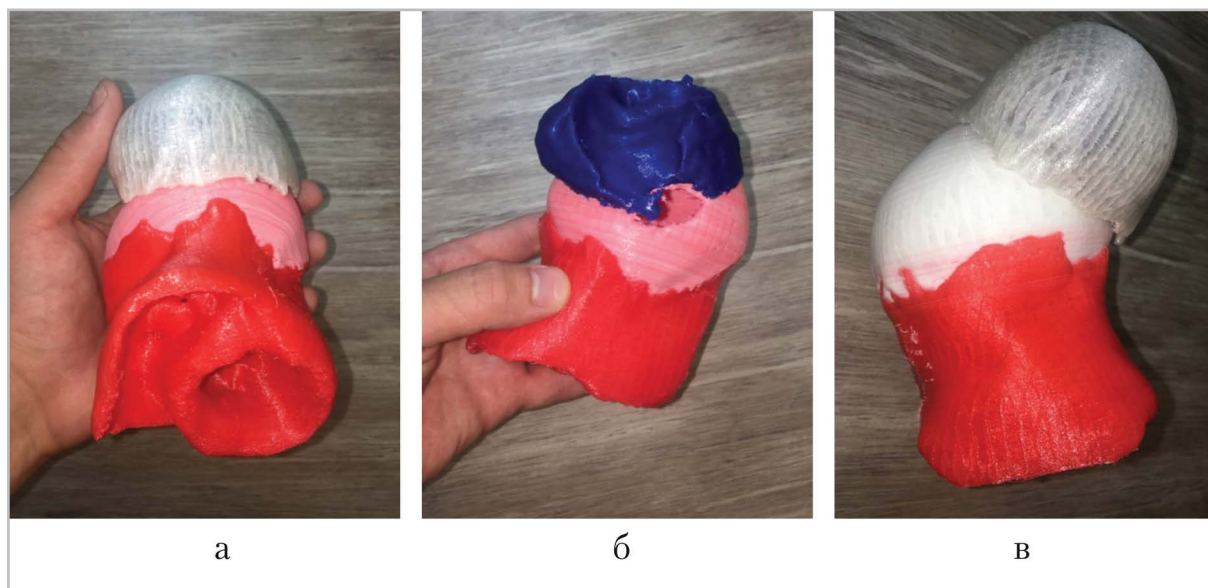


Рис. 4. Изготовленная 3D-модель сердца (в масштабе 1:1) для предоперационного планирования: *а* — вид со стороны базальных отделов и нижней стенки левого желудочка; *б* — вид левого желудочка без части купола аневризмы выше тромботических масс; *в* — вид со стороны боковой стенки левого желудочка

ту была выполнена операция в условиях искусственного кровообращения: аортокоронарное шунтирование, резекция

аневризмы левого желудочка с пластикой по Дор 2 с наложением кисетного эндовентрикулярного шва по Жатане



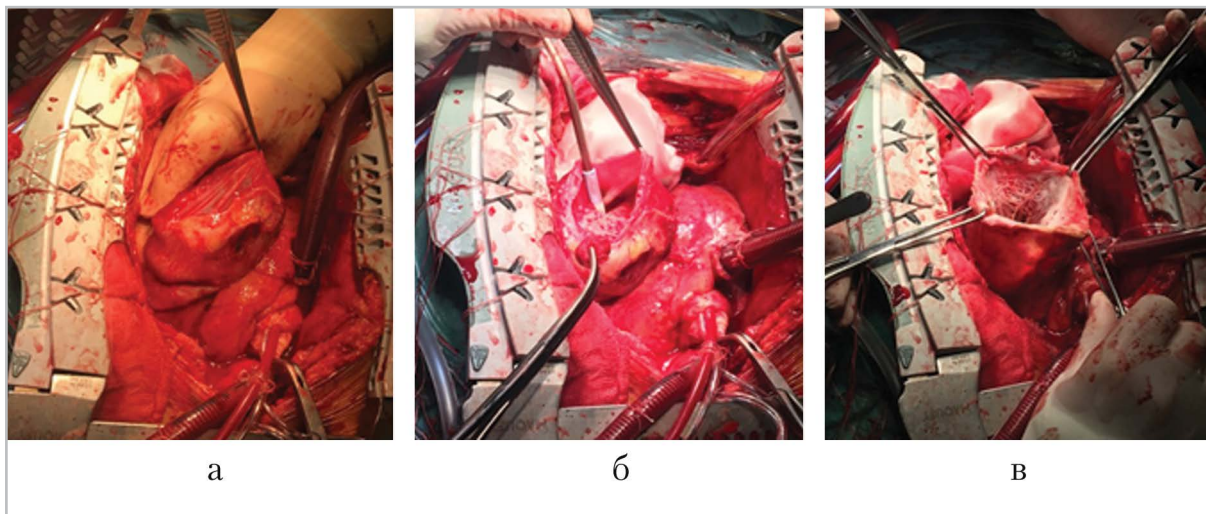


Рис. 5. Интраоперационные фотографии: *а* — визуальная оценка верхней части аневризмы (аневризма верхушки левого желудочка); *б* — тромбэктомия из левого желудочка, аневризмэктомия; *в* — *в* — левый желудочек после тромбэктомии и аневризмэктомии

и вшиванием дакроновой заплаты непрерывным швом (рис. 5, *а* — *в*). Общее время операции составило 3 ч 40 мин, время искусственного кровообращения — 92 мин, время пережатия аорты — 66 мин.

Через месяц после оперативного вмешательства пациенту было выполнено контрольное МР-исследование сердца. Недостаточность аортального клапана сохранилась на том же уровне, а недостаточность митрального и трикуспидального клапанов регрессировала до 0–1-й ст. Функциональные показатели левого желудочка были следующими: КСО — 45 мл, КДО — 87 мл, ФВ — 48 %. Участков накопления контрастного вещества выявлено не было.

### Обсуждение

Аддитивные технологии, в том числе и различные виды 3D-печати, получили интенсивное развитие в медицине за последние 20 лет [5]. Анализ публикаций показывает устойчивый экспоненциальный рост, что является отражением ин-

тереса научного сообщества к исследованиям в этой области [9]. В настоящее время 3D-модели все более активно используются в таких специальностях, как стоматология, травматология, челюстно-лицевая хирургия, нейрохирургия [3]. Сердечно-сосудистая хирургия не является исключением. В кардиохирургии наиболее значимыми «точками приложения» являются: предоперационное планирование; образовательный процесс; моделирование гемодинамики и изготовление персонифицированных медицинских устройств [28]. На сегодняшний день предоперационному планированию и образовательному процессу посвящено основное количество научных статей. В предоперационном планировании 3D-печать наиболее часто применяется при изготовлении моделей ушка левого предсердия для подборки окклюдера, создания макетов сердца у пациентов со сложными врожденными пороками, проектировании моделей выносящего тракта для подбора диаметра имплантируемого аортального клапана и т. д. [14].

Одними из важнейших условий использования DICOM-изображений для сегментации являются высокое пространственное разрешение и тканевая контрастность. Именно от этих параметров зависит качество получаемой 3D-модели. КТ и МРТ, а также УЗИ занимают главную роль в технологической цепи изготовления 3D-моделей, так как являются непосредственным источником изображений для сегментации. Также методам лучевой диагностики по праву принадлежит главная роль в диагностике ПАЛЖ. Чаще всего при данной патологии диагностика ограничивается выполнением эхокардиографии (эхоКГ) и коронароангиографии. Преимуществами данного метода остаются доступность, мобильность, независимость от сердечного ритма и низкая стоимость как аппарата, так и самого исследования. К его недостаткам можно отнести: нечеткое определение границ эндокарда для определения объемов левого желудочка; сложности в оценке распространенности фиброзных изменений, наличия и размеров внутрисердечного тромба, измерения толщины стенок желудочков; операторозависимость. Все перечисленные недостатки, за исключением последнего, могут быть решены с применением эхоконтрастных веществ, однако в России эти препараты пока не получили широкого распространения [4]. Разновидностью ультразвукового метода диагностики является чреспищеводная эхоКГ, которая обеспечивает лучшее качество изображения, чем классическая эхоКГ, но по технике выполнения является полунинвазивной методикой и имеет ограничения в визуализации верхушки левого желудочка. КТ у пациентов с ПАЛЖ в основном ис-

пользуется для визуализации и оценки коронарных артерий, местоположения и обызвествления аневризмы, визуализации тромботических масс, а также диагностики псевдоаневризм [26, 27]. Компьютерные томографы позволяют получать изображения фиброзных изменений миокарда, однако они уступают МР-изображениям по тканевой контрастности. Причиной этому служит довольно близкий диапазон денситометрических показателей здорового и фиброзно-измененного миокарда на постконтрастных изображениях.

В настоящее время МРТ сердца с контрастированием является «золотым стандартом» в визуализации фиброзных изменений миокарда [21], которые по сути являются анатомическим субстратом аневризмы. Кроме того, функциональные показатели сердца, рассчитанные на основе МР-изображений киноимпульсных последовательностей, считаются референсными. Такие показатели, как конечно-систолический объем, фракция выброса и конечно-диастолический объем левого желудочка, имеют высокую прогностическую ценность у пациентов с хронической сердечной недостаточностью и непосредственно влияют на тактику лечения [24]. К преимуществам данного метода исследования можно отнести отсутствие лучевой нагрузки, высокую тканевую контрастность, к недостаткам — толщину среза, которая при использовании стандартных импульсных последовательностей составляет 8 мм, и пространственное разрешение, которое ниже, чем у КТ. При помощи постконтрастной 3D-фазочувствительной импульсной последовательности «инверсия — восстановление» на основе сверхбыстрого градиентного эха воз-

можно получение изображений желудочков с улучшенным пространственным разрешением. На основе данных МР-изображений возможно создание 3D-моделей сердца у пациента с ПАЛЖ для предоперационного планирования.

Стоит отметить, что изучение 3D-модели позволяет равнозначно интерпретировать патологические изменения всей хирургической командой, в отличие от визуализации плоскостных изображений на экране монитора или пленке [23].

С помощью технологий 3D-моделирования и 3D-печати у хирургов появилась возможность изучить 3D-макет оперируемого органа до того, как будет «нанесен первый разрез». Изготовленная 3D-модель по разработанной нами методике позволила визуализировать оперируемый орган в масштабе 1:1, границы аневризмы и толщину распространения фиброзных изменений в миокарде. Кроме того, учитывая характер патологических изменений и высокий риск интраоперационных осложнений, пациенту до стернотомии был установлен внутриаортальный баллонный контропульсатор. Патологические изменения изготовленной 3D-модели визуально совпали с интраоперационными результатами (рис. 5, а – в). В результате предоперационного планирования снизилось ожидаемое время операции и искусственного кровообращения.

Общее время МР-сканирования пациента, сегментации изображений, печати и постобработки 3D-модели составило ~ 38 ч. Учитывая такие сроки изготовления модели, предоперационное планирование с применением аддитивных технологий в настоящее время применимо в плановом порядке.

## Выводы

1. МРТ сердца с контрастным усилением является высокоинформативным методом визуализации ПАЛЖ. Усовершенствованная методика сканирования позволила получить МР-изображения, пригодные для создания многоцветной эластичной 3D-модели.
2. 3D-модель позволила заблаговременно оценить патологические изменения, спланировать и отработать основные этапы хирургического вмешательства, а также провести необходимые мероприятия по подготовке пациента.

## Список литературы

1. Алишбая М. М., Вищипанов С. А., Вищипанов А. С., Никифорова М. А. Хирургическое лечение молодых больных с постинфарктной аневризмой сердца // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 2014. № 2. С. 41–43.
2. Бабочкин В. Е., Шипулин В. М., Антонченко И. В. и др. Радиочастотные метки в хирургическом лечении больных с постинфарктной аневризмой левого желудочка и желудочковыми тахикардиями // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 2011. № 5. С. 23–28.
3. Багатурия Г. О. Перспективы использования 3D-печати при планировании хирургических операций // Медицина: теория и практика. 2016. № 1 (1). С. 26–35.
4. Буховец И. Л., Максимова А. С., Михеев С. Л. и др. Использование контрастного усиления в амбулаторной ультразвуковой диагностике для выявления и оценки тяжести постинфарктной аневризмы левого желудочка // Российский электронный журнал лучевой диагностики. 2017. № 2 (7). С. 186–190.

5. *Коровин А. Е., Нагибович О. А., Пелешок С. А. и др.* 3D-моделирование и биопрототипирование в военной медицине // Клиническая патофизиология. 2015. № 3. С. 17–23.
6. *Лыков Р. А., Кранин Д. Л., Замский К. С. и др.* Хирургическое лечение пациентов с постинфарктными аневризмами левого желудочка сердца, осложненными тромбозом // Вестник национально-го медико-хирургического центра им. Н. И. Пирогова. 2013. № 2 (8). С. 7–9.
7. *Майстренко Н. С., Сухова И. В., Майстренко А. Д. и др.* Оценка ремоделирования левого желудочка после хирургической коррекции постинфарктной аневризмы // Медицинский совет. 2017. № 12. С. 90–98.
8. *Мерзляков В. Ю., Скопин А. И., Меликулов А. А. и др.* Хирургическое лечение постинфарктной аневризмы левого желудочка в условиях параллельной перфузии у молодого пациента // Бюллетень НЦССХ им. А. Н. Бакулева РАМН сердечно-сосудистые заболевания. 2016. № 6 (17). С. 72–76.
9. *Нагибович О. А., Свистов Д. В., Пелешок С. А. и др.* Применение технологии 3D-печати в медицине // Клиническая патофизиология. 2017. № 3 (23). С. 14–22.
10. *Пасечник И. Н., Тимашков Д. А., Молочков А. В. и др.* Гигантская постинфарктная аневризма левого желудочка сердца // Кремлевская медицина. Клинический вестник. 2017. № 3. С. 120–124.
11. *Сайфуллина Г. Б., Садыков А. Р., Ибатуллин. М. М. и др.* Роль ЭКГ-синхронизированной однофотонной эмиссионной компьютерной томографии в определении объема хирургического лечения больных ишемической болезнью сердца с постинфарктным кардиосклерозом, осложненной систолической дисфункцией левого желудочка // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 2014. № 1. С. 32–40.
12. *Чернявский А. М., Карева Ю. Е., Денисова М. А., Эфендиев В. У.* Проблема предоперационного моделирования левого желудочка // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. 2015. № 2 (8). С. 4–7.
13. *Чрагян В. А., Мусаев О. Г., Аскадинов М. Н. и др.* Непосредственные результаты хирургического лечения постинфарктных аневризм левого желудочка путем восстановления оптимального объема и геометрии левого желудочка // Уральский мед. журнал. 2018. № 4 (159). С. 13–16.
14. *Abudayyeh I., Gordon B., Ansari M. et al.* Practical guide to cardiovascular 3D printing in clinical practice: Overview and examples // J. of Int. Cardiol. 2018. № 3 (31). С. 375–383.
15. *Babokin V., Shipulin V., Batalov R., Popov S.* Surgical ventricular reconstruction with endocardectomy along radiofrequency ablation-induced markings // The J. of Thoracic and Cardiovasc. Surg. 2013. № 5 (146). С. 1133–1138.
16. *Benediktsson R., Eyjolfsson O., Thorgerirsson G.* Natural history of chronic left ventricular aneurysm; a population based cohort study // J. of Clin. Epidemiol. 1991. № 11 (44). С. 1131–1139.
17. *Cohn L. H., Adams D. H.* Cardiac surgery in the adult // L. H. Cohn, D. H. Adams. New York: McGraw-Hill Education / Medical, 2008. 1456 с.
18. *Dor V., Kreitmann P., Jourdan J. et al.* Left ventricular aneurysm: a new surgical approach // The Thoracic and Cardiovasc. Surg. 1989. № 1 (37). С. 11–19.
19. *Dor V., Saab M., Coste P. et al.* Interest of physiological closure (circumferential plasty on contractile areas) of left ventricle

- after resection and endocardectomy for aneurysm of akinetic zone comparison with classical technique about a series of 209 left ventricular resections // *J. Cardiovasc. Surg.* 1985. № 26. C. 73.
20. *Faxon D. P., Ryan T. J., Davis K. B. et al.* Prognostic significance of angiographically documented left ventricular aneurysm from the Coronary Artery Surgery Study (CASS) // *Am. J. of Cardiol.* 1982. № 1 (50). C. 157–164.
  21. *Jablonowski R., Nordlund D., Kanski M. et al.* Infarct quantification using 3D inversion recovery and 2D phase sensitive inversion recovery; validation in patients and ex vivo // *BMC Cardiovasc. Disorders.* 2013. № 13. C. 110.
  22. *Kawel-Boehm N., Maceira A., Valsangiacomo-Buechel E. R. et al.* Normal values for cardiovascular magnetic resonance in adults and children // *J. of Cardiovasc. Magnetic Res.* 2015. № 17. C. 29.
  23. *Liu P., Liu R., Zhang Y. et al.* The value of 3D printing models of left atrial appendage using real-time 3D transesophageal echocardiographic data in left atrial appendage occlusion: applications toward an era of truly personalized medicine // *Cardiol.* 2016. № 4 (135). C. 255–261.
  24. *Masi M. R., Lores I. M., García de Castro A. B. et al.* Preoperative and follow-up cardiac magnetic resonance imaging of candidates for surgical ventricular restoration // *Radiol.* 2016. № 1 (58). C. 38–45.
  25. *Meier L. M., Meineri M., Hiansen J. Q., Horlick E. M.* Structural and congenital heart disease interventions: the role of three-dimensional printing // *Netherlands Heart J.: Monthly J. of the Netherlands Society of Cardiology and the Netherlands Heart Foundation.* 2017. № 2 (25). C. 65–75.
  26. *Shambrook J. S., Chowdhury R., Brown I. W. et al.* Cross-sectional imaging appearances of cardiac aneurysms // *Clin. Radiol.* 2010. № 5 (65). C. 349–357.
  27. *Shriki J. E., Shinbane J., Lee C. et al.* Incidental myocardial infarct on conventional nongated CT: a review of the spectrum of findings with gated CT and cardiac MRI correlation // *AJR. Am. J. of Roentgenol.* 2012. № 3 (198). C. 496–504.
  28. *Vukicevic M., Mosadegh B., Min J. K., Little S. H.* Cardiac 3D printing and its future directions // *JACC. Cardiovasc. Imag.* 2017. № 2 (10). C. 171–184.

## References

1. *Alshibaya M. M., Vishchipanov S. A., Vishchipanov A. S., Nikiforova M. A.* Surgical treatment of young patients with post-infarction heart aneurysm. *J. of Thoracic and Cardiovasc. Surg.* 2014. No. 2. P. 41–43 (in Russian).
2. *Babokin V. E., Shipulin V. M., Antonchenko I. V. et al.* Radiofrequency labels in surgical treatment of patients with post-infarction left ventricular aneurysm and ventricular tachycardia. *J. of Thoracic and Cardiovasc. Surg.* 2011. No. 5. P. 23–28 (in Russian).
3. *Bagaturiya G. O.* Prospects for the use of 3D printing in planning surgical operations. *Medicine: theory and practice.* 2016. No. 1 (1). P. 26–35 (in Russian).
4. *Bukhovets I. L., Maksimova A. S., Mikheev S. L. et al.* The use of contrast enhancement in outpatient ultrasound diagnostics to identify and assess the severity of postinfarction left ventricular aneurysm. *Russian Electronic J. of Radiol.* 2017. No. 2 (7). P. 186–190 (in Russian).
5. *Korovin A. E., Nagibovich O. A., Peleshok S. A. et al.* 3D-modeling and bioprototyping in military medicine. *J. of Clin.*

- Pathophysiol. 2015. No. 3. P. 17–23 (in Russian).
6. *Lykov R. A., Kranin D. L., Zamskiy K. S. et al.* Surgical treatment of patients with postinfarction aneurysms of the left ventricle of the heart complicated by thrombosis. Bulletin of Pirogov National Medical and Surgical Center. 2013. No. 2 (8). P. 7–9 (in Russian).
  7. *Maystrenko N. S., Sukhova I. V., Maystrenko A. D. et al.* Evaluation of remodeling of the left ventricle after surgical correction of postinfarction aneurysm. Medical Council. 2017. No. 12. P. 90–98 (in Russian).
  8. *Merzlyakov V. Yu., Skopin A. I., Melikulov A. A. et al.* Surgical treatment of postinfarction aneurysm of the left ventricle in conditions of parallel perfusion in a young patient. Bulletin of Bakoulev Center Cardiovascular Diseases. 2016. No. 6 (17). P. 72–76 (in Russian).
  9. *Nagibovich O. A., Svistov D. V., Peleshok S. A. et al.* The use of 3D printing technology in medicine. J. of Clinical Pathophysiol. 2017. No. 3 (23). P. 14–22 (in Russian).
  10. *Pasechnik I. N., Timashkov D. A., Molochkov A. V. et al.* Giant post-infarction aneurysm of the left ventricle of the heart. Cremlin Medicine J. 2017. No. 3. P. 120–124 (in Russian).
  11. *Sayfullina G. B., Sadykov A. R., Ibatullin M. M. et al.* The role of ECG-synchronized single-photon emission computed tomography in determining the volume of surgical treatment for patients with coronary heart disease with post-infarction cardiosclerosis complicated by systolic dysfunction of the left ventricle. J. of Thoracic and Cardiovasc. Surg. 2014. No. 1. P. 32–40 (in Russian).
  12. *Chernyavskiy A. M., Kareva Yu. E., Denisova M. A., Efendiev V. U.* The problem of preoperative modeling of the left ventricle. J. of Cardiol. and Cardiovasc. Surg. 2015. No. 2 (8). P. 4–7 (in Russian).
  13. *Chragyan V. A., Musaev O. G., Askadinov M. N. et al.* Immediate results of surgical treatment of post-infarction left ventricular aneurysms by restoring the optimal volume and geometry of the left ventricle. Ural Medical J. 2018. No. 4 (159). P. 13–16 (in Russian).
  14. *Abudayyeh I., Gordon B., Ansari M. et al.* Practical guide to cardiovascular 3D printing in clinical practice: Overview and examples. J. of Int. Cardiol. 2018. No. 3 (31). P. 375–383.
  15. *Babokin V., Shipulin V., Batalov R., Popov S.* Surgical ventricular reconstruction with endocardectomy along radiofrequency ablation-induced markings. J. of Thoracic and Cardiovasc. Surg. 2013. No. 5 (146). P. 1133–1138.
  16. *Benediktsson R., Eyjolfsson O., Thorgeirsson G.* Natural history of chronic left ventricular aneurysm; a population based cohort study. J. of Clin. Epidemiol. 1991. No. 11 (44). P. 1131–1139.
  17. *Cohn L. H., Adams D. H.* Cardiac surgery in the adult / L. H. Cohn, D. H. Adams, New York: McGraw-Hill Education / Medical, 2008. 1456 p.
  18. *Dor V., Kreitmann P., Jourdan J. et al.* Left ventricular aneurysm: a new surgical approach. The Thoracic and Cardiovasc. Surg. 1989. No. 1 (37). P. 11–19.
  19. *Dor V., Saab M., Coste P. et al.* Interest of physiological closure (circumferential plasty on contractile areas) of left ventricle after resection and endocardectomy for aneurysm of akinetic zone comparison with classical technique about a series of 209 left ventricular resections. J. Cardiovasc. Surg. 1985. No. 26. C. 73.
  20. *Faxon D. P., Ryan T. J., Davis K. B. et al.* Prognostic significance of angiographically documented left ventricular

- aneurysm from the Coronary Artery Surgery Study (CASS). *Am. J. of Cardiol.* 1982. No. 1 (50). P. 157–164.
21. *Jablonowski R., Nordlund D., Kanski M. et al.* Infarct quantification using 3D inversion recovery and 2D phase sensitive inversion recovery; validation in patients and ex vivo // *BMC Cardiovasc. Disorders.* 2013. No. 13. P. 110.
  22. *Kawel-Boehm N., Maceira A., Valsangiacomo-Buechel E. R. et al.* Normal values for cardiovascular magnetic resonance in adults and children. *J. of Cardiovasc. Magnetic Res.* 2015. No. 17. P. 29.
  23. *Liu P., Liu R., Zhang Y. et al.* The value of 3D printing models of left atrial appendage using real-time 3D transesophageal echocardiographic data in left atrial appendage occlusion: applications toward an era of truly personalized medicine. *Cardiol.* 2016. No. 4 (135). P. 255–261.
  24. *Masi M. R., Lores I. M., García de Castro A. B. et al.* Preoperative and follow-up cardiac magnetic resonance imaging of candidates for surgical ventricular restoration. *Radiol.* 2016. No. 1 (58). P. 38–45.
  25. *Meier L. M., Meineri M., Hiansen J. Q., Horlick E. M.* Structural and congenital heart disease interventions: the role of three-dimensional printing. *Netherlands Heart J.: Monthly J. of the Netherlands Society of Cardiology and the Netherlands Heart Foundation.* 2017. No. 2 (25). P. 65–75.
  26. *Shambrook J. S., Chowdhury R., Brown I. W. et al.* Cross-sectional imaging appearances of cardiac aneurysms. *Clin. radiol.* 2010. No. 5 (65). P. 349–357.
  27. *Shriki J. E., Shinbane J., Lee C. et al.* Incidental myocardial infarct on conventional nongated CT: a review of the spectrum of findings with gated CT and cardiac MRI correlation. *AJR. Am. J. of Roentgenol.* 2012. No. 3 (198). P. 496–504.
  28. *Vukicevic M., Mosadegh B., Min J. K., Little S. H.* Cardiac 3D printing and its future directions. *JACC. Cardiovasc. Imag.* 2017. No. 2 (10). P. 171–184.

### Сведения об авторах

**Кушнарев Сергей Владимирович**, врач-рентгенолог, адъюнкт кафедры рентгенологии и радиологии с курсом ультразвуковой диагностики Военно-медицинской академии им. С. М. Кирова Минобороны России, Санкт-Петербург.  
Адрес: 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6.  
Тел.: +7 (812) 292-33-47. Электронная почта: s.v.kushnarev@yandex.ru  
ORCID.org/0000-0003-2841-2990

**Kushnarev Sergey Vladimirovich**, Radiologist, Adjunct, Department of Roentgenology and Radiology with a Course of Ultrasound Diagnostics, S. M. Kirov Military Medical Academy, Ministry of Defense of Russia, St. Petersburg.  
Address: 6, ul. Academica Lebedeva, St. Petersburg, 194044, Russia.  
Phone number: +7 (812) 292-33-47. E-mail: s.v.kushnarev@yandex.ru  
ORCID.org/0000-0003-2841-2990

**Железняк Игорь Сергеевич**, доктор медицинских наук, доцент, начальник кафедры рентгенологии и радиологии с курсом ультразвуковой диагностики Военно-медицинской академии им. С. М. Кирова Минобороны России, Санкт-Петербург.  
Адрес: 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6.  
Тел.: +7 (812) 292-33-47. Электронная почта: igzh@bk.ru  
ORCID.org/0000-0001-7383-512X

**Zheleznyak Igor Sergeevich**, M. D. Med., Associate Professor, Head of Department, Department of Roentgenology and Radiology with a Course of Ultrasound Diagnostics, S. M. Kirov Military Medical Academy, Ministry of Defense of Russia, St. Petersburg.  
Address: 6, ul. Academica Lebedeva, St. Petersburg, 194044, Russia.  
Phone number: +7 (812) 292-33-47. E-mail: igzh@bk.ru  
ORCID.org/0000-0001-7383-512X

**Кравчук Вячеслав Николаевич**, доктор медицинских наук, доцент, сердечно-сосудистый хирург, заведующий кафедрой сердечно-сосудистой хирургии Северо-Западного государственного медицинского университета, профессор 1 кафедры (хирургии усовершенствования врачей) Военно-медицинской академии, Санкт-Петербург.  
Адрес: 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6.  
Тел.: +7 (812) 292-33-47. Электронная почта: kravchuk9@yandex.ru  
ORCID.org/0000-0002-6337-104X

**Kravchuk Viacheslav Nikolaevich**, M. D. Med., Associate Professor, Cardiovascular Surgeon, Head of Department of Cardiovascular Surgery North-West State Medical University named after I. I. Mechnikov, Professor of Department of Surgery for Advanced Medical Education, S. M. Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg.  
Address: 6, ul. Academica Lebedeva, St. Petersburg, 194044, Russia.  
Phone number: +7 (812) 292-33-47. E-mail: kravchuk9@yandex.ru  
ORCID.org/0000-0002-6337-104X

**Рудь Сергей Дмитриевич**, кандидат медицинских наук, врач-рентгенолог, преподаватель кафедры рентгенологии и радиологии с курсом ультразвуковой диагностики Военно-медицинской академии им. С. М. Кирова Минобороны России, Санкт-Петербург.  
Адрес: 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6.  
Тел.: +7 (812) 292-33-47. Электронная почта: rsd@mail.ru  
ORCID.org/0000-0002-3585-9793

**Rud' Sergey Dmitrievich**, Ph. D. Med., Radiologist, Teacher of Department of Roentgenology and Radiology with a Course of Ultrasound Diagnostics, S. M. Kirov Military Medical Academy, Ministry of Defense of Russia, St. Petersburg.  
Address: 6, ul. Academica Lebedeva, St. Petersburg, 194044, Russia.  
Phone number: +7 (812) 292-33-47. E-mail: rsd@mail.ru  
ORCID.org/0000-0002-3585-9793

**Ширшин Александр Вадимович**, врач-рентгенолог клиники рентгенодиагностики и ультразвуковой диагностики Военно-медицинской академии им. С. М. Кирова Минобороны России, Санкт-Петербург.  
Адрес: 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6.  
Тел.: +7 (812) 292-33-47. Электронная почта: asmdot@gmail.com  
ORCID.org/0000-0002-1494-9626

**Shirshin Aleksandr Vadimovich**, Radiologist, Clinic of Roentgenoradiology and Ultrasound Diagnostics, S. M. Kirov Military Medical Academy, Ministry of Defense of Russia, St. Petersburg.  
Address: 6, ul. Academica Lebedeva, St. Petersburg, 194044, Russia.  
Phone number: +7 (812) 292-33-47. E-mail: asmdot@gmail.com  
ORCID.org/0000-0002-1494-9626

**Князев Евгений Алексеевич**, сердечно-сосудистый хирург, старший ординатор 1 кафедры (хирургии усовершенствования врачей) Военно-медицинской академии им. С. М. Кирова Минобороны России, Санкт-Петербург.  
Адрес: 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6.  
Тел.: +7 (812) 292-33-47. Электронная почта: zemfi2002@mail.ru  
ORCID.org/0000-0002-7850-911X

**Knyazev Evgeniy Alekseevich**, Cardiovascular Surgeon, Chief Resident of Department of Surgery for Advanced Medical Education of S. M. Kirov Military Medical Academy, Ministry of Defense of Russia, St. Petersburg.  
Address: 6, ul. Academica Lebedeva, St. Petersburg, 194044, Russia.  
Phone number: +7 (812) 292-33-47. E-mail: zemfi2002@mail.ru  
ORCID.org/0000-0002-7850-911X

**Меньков Игорь Анатольевич**, кандидат медицинских наук, врач-рентгенолог, заведующий отделением лучевой диагностики клиники рентгенодиагностики и ультразвуковой диагностики Военно-медицинской академии им. С. М. Кирова Минобороны России, Санкт-Петербург.  
Адрес: 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6.  
Тел.: +7 (812) 292-33-47. Электронная почта: i.menkov@gmail.com  
ORCID.org/0000-0002-1569-2180

**Men'kov Igor Anatolevich**, Ph. D. Med., Radiologist, Chief of Department of Diagnostic Radiology of Clinic of Roentgenoradiology and Ultrasound Diagnostics, S. M. Kirov Military Medical Academy, Ministry of Defense of Russia, St. Petersburg.  
Address: 6, ul. Academica Lebedeva, St. Petersburg, 194044, Russia.  
Phone number: +7 (812) 292-33-47. E-mail: i.menkov@gmail.com  
ORCID.org/0000-0002-1569-2180

**Романов Геннадий Геннадиевич**, кандидат медицинских наук, врач-рентгенолог, старший преподаватель кафедры рентгенологии и радиологии с курсом ультразвуковой диагностики Военно-медицинской академии им. С. М. Кирова Минобороны России, Санкт-Петербург.  
Адрес: 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6.  
Тел.: +7 (812) 292-33-47. Электронная почта: romanov\_gennadiy@mail.ru  
ORCID.org/0000-0001-5987-8158

**Romanov Gennadiy Gennadievich**, Ph. D. Med., Radiologist, Senior Teacher in Department Roentgenology and Radiology with a Course of Ultrasound Diagnostics, S. M. Kirov Military Medical Academy, Ministry of Defense of Russia, St. Petersburg.  
Address: 6, ul. Academica Lebedeva, St. Petersburg, 194044, Russia.  
Phone number: +7 (812) 292-33-47. E-mail: romanov\_gennadiy@mail.ru  
ORCID.org/0000-0001-5987-8158

**Финансирование исследования и конфликт интересов.**

*Исследование не финансировалось какими-либо источниками. Авторы заявляют, что данная работа, ее тема, предмет и содержание не затрагивают конкурирующих интересов.*