

РЕДАКЦИОННАЯ СТАТЬЯ / EDITORIAL

УДК 677.025.1

<http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-3-7-13>

© Кушнарев С.В., Железняк И.С., Кравчук В.Н., Рудь С.Д., Ширшин А.В., Меньков И.А., Романов Г.Г., 2020 г.

ПРИМЕНЕНИЕ 3D-МОДЕЛЕЙ СЕРДЦА, СОЗДАНЫХ НА ОСНОВЕ DICOM-ИЗОБРАЖЕНИЙ, В МЕДИЦИНСКОЙ ПРАКТИКЕ¹С. В. Кушнарев, ¹И. С. Железняк, ^{1,2}В. Н. Кравчук, ¹С. Д. Рудь, ^{1,3}А. В. Ширшин, ¹И. А. Меньков, ¹Г. Г. Романов¹Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия²Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия³Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Трехмерная печать (3D-печать, аддитивное производство, быстрое прототипирование) – это технология создания физического объекта из цифровой модели путем послойного добавления материала. Относительная простота создания 3D-моделей, их индивидуализация и кастомизация отличают аддитивные технологии от серийного производства. Возможность демонстрировать анатомию сердца с помощью 3D-моделей определила их использование в кардиохирургии, в первую очередь, в ходе образовательного процесса и предоперационного планирования, а также для тестирования имплантируемых устройств и моделирования гемодинамики. Несмотря на то, что роль 3D-моделей в клинической практике в настоящее время не определена, внедрение 3D-печати способно дать важные преимущества в решении ряда диагностических и лечебных задач. В статье представлены результаты анализа научных статей, посвященных применению трехмерных физических моделей сердца в кардиохирургической практике.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, компьютерная томография, 3D-модель, предоперационное планирование, анатомия сердца

Контакт: Кушнарев Сергей Владимирович, s.v.kushnarev@yandex.ru

© Kushnarev S.V., Zheleznyak I.S., Kravchuk V.N., Rud S.D., Shirshin A.V., Menkov I.A., Romanov G.G., 2020

A APPLICATION OF 3D HEART MODELS CREATED ON DICOM DATA IN MEDICAL PRACTICE¹Sergey V. Kushnarev, ¹Igor S. Zheleznyak, ^{1,2}Viacheslav N. Kravchuk, ¹Sergey D. Rud, ^{1,3}Aleksandr V. Shirshin,¹Igor A. Menkov, ¹Gennadiy G. Romanov¹S. M. Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg, Russia²North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov, St. Petersburg, Russia³ITMO University, St. Petersburg, Russia

Three-dimensional printing (3D printing, additive manufacturing, rapid prototyping) is a technology of a physical object creation from digital model by layered addition of material. Additive technologies differ from mass production by personalization, customization and relative simplicity of 3D-models creation. 3D models ability to demonstrate heart anatomy is of use in cardiac surgery, primarily during the educational process and preoperative planning and, less common, for implantable devices testing and hemodynamic modeling. Although the role of 3D models in clinical practice is not currently defined, 3D printing mass application can provide important advantages to solve a number of diagnostic and therapeutic issues. The article presents the revue of scientific publications describing the use of physical three-dimensional heart models in cardiac surgery.

Key words: magnetic resonance imaging, computed tomography, 3D model, preoperative planning, heart anatomy

Contact: Kushnarev Sergey Vladimirovich, s.v.kushnarev@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кушнарев С.В., Железняк И.С., Кравчук В.Н., Рудь С.Д., Ширшин А.В., Меньков И.А., Романов Г.Г. Применение 3D-моделей сердца, созданных на основе DICOM-изображений, в медицинской практике (обзор литературы) // *Лучевая диагностика и терапия*. 2020. Т. 11, № 3. С. 7–13, <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-3-7-13>.

Conflict of interests: the author stated that there is No. potential conflict of interests.

For citation: Kushnarev S.V., Zheleznyak I.S., Kravchuk V.N., Rud S.D., Shirshin A.V., Menkov I.A., Romanov G.G. A application of 3D heart models created on DICOM data in medical practice (systematic review) // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2020. Vol. 11, No. 3. P. 7–13, <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-3-7-13>.

Введение. Трехмерная печать (3D-печать, аддитивное производство, быстрое прототипирование) — это технология производства физической модели на основе ее цифрового изображения [1]. Идея создания трехмерных физических объектов принадлежит Чарльзу Халлу (Charles Hall), получившему патент на соответствующее изобретение в 1986 г. [2]. С конца 1980-х годов технология применялась в медицине для изготовления хирургических имплантатов в челюстно-лицевой хирургии и протезирования в ортопедии [3]. За последние 10 лет метод предоперационного планирования с использованием персонализированных 3D-моделей нашел применение в кардиохирургии, трансплантологии, пластической и реконструктивной хирургии, травматологии, урологии и во многих других областях медицины [4, 5].

До недавнего времени не было уверенности в том, что 3D-печать будет полезным инструментом в клинической практике и не станет технологией с неизвестным назначением. События последних лет указывают на целесообразность продолжения исследований в данном направлении [6], несмотря на достаточное количество проблем и недостатков этой технологии [7]. Прогресс технологий трехмерной печати и вычислительных мощностей компьютеров сделал 3D-печать доступным инструментом благодаря относительно низкой стоимости как самой печати, так и оборудования для нее.

Варианты анатомии сердца и его магистральных сосудов являются разнообразными и сложными [8]. Планирование оперативного вмешательства зависит от практических навыков кардиохирурга, приобретенных в ходе многолетнего опыта. Одним из таких навыков является способность определения варианта сердечно-сосудистой анатомии путем анализа двухмерных плоскостных изображений на экране монитора. Однако структуры сердца как на экране монитора, так и на пленке не соответствуют их реальному размеру, что еще больше усложняет задачу планирования операции [9]. Кроме того, изучение 3D-модели позволяет равнозначно интерпретировать патологические изменения всем специалистам из хирургической бригады, в отличие от визуализации плоскостных изображений на экране монитора или пленке [10].

Возможность наглядно демонстрировать сложную анатомию сердца с помощью 3D-моделей сделала аддитивные методы многообещающими для использования в кардиохирургии в ходе образовательного процесса, предоперационного планирования, тестирования имплантируемых устройств [3], а также для моделирования гемодинамических процессов [11].

Анализ научной литературы демонстрирует уверенный экспоненциальный рост числа публикаций, посвященных 3D-печати, что является показателем интереса со стороны научного сообщества к данной теме (рисунок).

Относительная простота создания уникальных моделей позволяет их делать персонализированными и точно подходящими под конкретные задачи, в отличие от серийного производства [12]. Широкое внедрение 3D-печати может стать основным способом решения сложных диагностических и хирургических задач [9].

Благодаря своей способности наглядно демонстрировать сложную анатомию сердца и магистральных сосудов 3D-печать быстро набирает популярность в сердечно-сосудистой хирургии [13]. Анализ научных работ показывает, что методика широко внедряется в предоперационное планирование и образовательный процесс [14]. Также существуют работы, посвященные моделированию и тестированию имплантируемых медицинских устройств [15], а также моделированию гемодинамических процессов [11, 16].

В статье представлены результаты анализа научных статей, посвященных применению трехмерных физических моделей сердца в кардиохирургической практике.

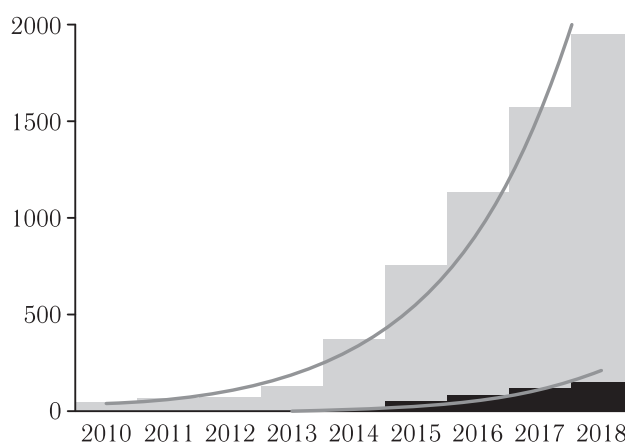


Рисунок. Динамика публикаций научных работ, посвященных 3D-печати в медицине (показана серым цветом) и сердечно-сосудистой хирургии (показана черным цветом)

Figure. The dynamics of publications of scientific papers on 3D printing in medicine (in gray) and cardiovascular surgery (in black)

Предоперационное планирование. Одной из первых работ, посвященных использованию технологии 3D-печати сердца, а точнее его части была опубликована еще в 2000 г. Т. М. Binder и соавт. изложили результаты своей работы в статье посвященной созданию 24 3D-моделей митрального клапана. В статье описывается алгоритм создания моделей на основе данных, полученных методом трансэзофагеальной ЭхоКГ. Для изготовления 3D-моделей использовался метод стереолитографии. Авторы резюмировали, что создание 3D-моделей позволяет точно воссоздать и описать анатомию и патологию митрального клапана, а в будущем существенно влиять на предоперационное планирование [17].

В 2006 г. Е. М. Ngan и соавт. выполнили исследование, посвященное предоперационному планированию в кардиохирургии на 3D-моделях сердца с магистральными сосудами. Шести пациентам с атрезией легочной артерии, дефектом межжелудочковой перегородки и аортопальмональными фистулами было выполнено оперативное лечение, которое планировалось на 3D-моделях [18]. Сами прототипы были изготовлены на основе данных КТ. Точность сосудистой патологии, отображаемой на 3D-моделях, составила 96%. По мнению авторов, недостатками твердых моделей являются: отсутствие подвижности, эластичности и хрупкость, особенно в местах стенозов, что затрудняло их обработку. В этом же году А.М. Noescke и соавт. сообщили об изготовлении гибких 3D-моделей, также на основе данных КТ. Авторы использовали 3D-модели грудной клетки и сердца для разработки медицинских имплантируемых устройств, в частности педиатрических систем поддержки кровообращения у детей с пороками развития. Стоит отметить, что эластичные модели в данном исследовании были получены путем покрытия полиуретановыми материалами 3D-моделей, напечатанных из крахмала, который впоследствии растворялся [19].

В 2007 г. S. Schievano и соавт. на основе данных предоперационной МРТ изготовили 12 моделей выносящего тракта правого желудочка пациентам которым уже была выполнена имплантация клапана легочной артерии. Главной трудностью такой операции является оценка места имплантации до начала вмешательства. На основе полученных 3D-моделей двумя опытными кардиохирургами независимо друг от друга выполнялось моделирование оперативного вмешательства. По результатам работы установлено, что показания и противопоказания к операции оба кардиохирурга определяли корректнее, используя комбинацию МР-изображений и 3D-моделей. Авторы резюмируют, что 3D-модели могут быть использованы для определения показаний к оперативному вмешательству и индивидуальному подбору имплантируемых устройств [20].

S. Jacobs и соавт. в 2007 г. опубликовали результаты исследования, в котором описывался опыт применения 3D-моделей для предоперационного планирования пластики левого желудочка двух пациентов с постинфарктной аневризмой левого желудочка. В исследовании использовали данные КТ и МРТ для изготовления 3D-моделей сердца [21].

В исследовании 2015 г. X. Ma и соавт. использовали 3D-модели для предоперационного планирования у 35 пациентов с дефектом межжелудочковой перегородки при тетраде Фалло. Авторы отметили, что размеры дефекта межжелудочковой перегородки полученных моделей были сопоставимы с результатами интраоперационных измерений [22].

В 2016 г. P. Liu и соавт. на основе трехмерной чреспищеводной ЭхоКГ печатали 3D-модели ушка

левого предсердия, которые использовались для предоперационного подбора окклюдера [10].

H. Guo и соавт. на изготовленной 3D-модели не только отработывали этапы оперативного вмешательства у пациента с обструкцией выносящего тракта при гипертрофической кардиомиопатии, но и использовали ее в качестве наглядного пособия для демонстрации пациенту патологических изменений и этапов операции. Авторы приходят к выводу, что модель была полезна как при планировании септальной миэктомии, так и при установлении доверительного контакта с пациентом [23].

Образование и обучение. Восприятие трехмерного пространства по двумерным плоскостным изображениям представляет определенные сложности у обучаемых [3]. Использование 3D-моделей позволяет обучаемым изучить анатомию и отработать практические навыки оперативных вмешательств, не подвергая пациентов риску [24]. Моделирование оперативных вмешательств на 3D-моделях может использоваться опытными специалистами для повышения квалификации и обучения новым, более сложным манипуляциям [9]. По мнению ряда авторов, использование 3D-моделей сердца повысит демонстрационные возможности учебно-методической базы при изучении патологических структур и может быть не менее эффективным, чем изучение секционных анатомических препаратов [6, 25].

P. Costello и соавт. на основе данных МРТ изготавливали 3D-модели дефектов межжелудочковой перегородки для обучения студентов [26]. S. Ochoa и соавт. применяли 3D-модели сердца при обучении ЭхоКГ для улучшения понимания обучаемыми плоскостей сканирования [27].

В 2018 г. S. White и соавт. наряду с традиционными лекциями и плоскостными изображениями использовали 3D-модели для изучения врожденных пороков развития сердца и крупных сосудов. В качестве «простой» патологии использовали 3D-модели дефектов межжелудочковой перегородки, «сложной» — тетраду Фалло. Установили, что изучение «сложного» порока с использованием 3D-модели было более эффективным [28]. Похожее исследование выполнено J. Smerling и соавт. В этом исследовании преподаватели, наряду с традиционными методами обучения, применяли демонстрацию индивидуализированных анатомических макетов. Авторы изготовили модели пяти разных пороков сердца, которые ранжировались по сложности понимания патологических изменений. В качестве «простого» использовали стеноз легочного ствола, в качестве «сложного» — синдром гипоплазии левых отделов сердца. Исследователи пришли к выводу, что группа студентов, которая дополнительно использовала 3D-модели, сдала итоговый тест лучше, за счет понимания анатомии сложных пороков [29].

3D-модели применяли не только для образования медицинских специалистов. G. Biglino и соавт.

использовали 3D-модель в качестве наглядного пособия для объяснения этапов оперативного вмешательства пациентам с врожденным пороком сердца. По результатам исследования 3D-модели были полезны для улучшения взаимодействия с родственниками пациента, что оказало положительное влияние на психологическую адаптацию после операции [30].

В последнее время появляются работы с изготовлением и применением полиорганных 3D-моделей, которые, по своей сути, являются индивидуализированным предоперационным тренажером. I. Wamala и соавт. смоделировали грудную клетку пациента для отработки оптимального доступа при выполнении торакотомии и замене аортального клапана. Авторы использовали модель для подбора траектории проведения хирургического инструмента при выполнении правой переднебоковой миниторакотомии. В результате оказалось, что такое планирование операции улучшило пространственное понимание геометрических ограничений при проведении хирургического инструментария [31].

В образовательных медицинских учреждениях появляется все больше трудностей с получением секционного материала для учебного процесса. 3D-модели нормальных и патологически измененных органов могут уменьшить потребность в анатомических препаратах и не создают этических проблем [32].

Разработка имплантируемых устройств.

К имплантируемым медицинским устройствам в кардиохирургии относятся различные стенты, искусственные клапаны, окклюдеры, электроды и т.д. В настоящее время аддитивные технологии применяются при создании макетов для тестирования таких устройств. Однако существуют мнения, что в будущем изготовление этих устройств будет осуществляться с помощью 3D-печати [33].

До применения в клинике устройства должны быть протестированы в экспериментах и пройти клинические испытания. На протяжении многих лет разработка (усовершенствование) и тестирование осуществлялись на секционном материале или на животных. Подобный алгоритм не может быть использован для персонализированного подбора имплантируемого устройства. Тестирование новых или модифицированных имплантируемых устройств на 3D-моделях в перспективе позволит создавать персонализированные модели устройств [1, 6].

Несмотря на то, что в настоящее время 3D-печать в основном используется для предоперационной подготовки, первое исследование с применением 3D-моделей связано с разработкой медицинских имплантируемых устройств. В 1997 г. С. Park и соавт. разработали и изготовили корпуса для полностью имплантируемых искусственных сердец [15]. Их основополагающее исследование впервые продемонстрировало потенциал трехмерной печати в разработке персонализированных медицинских имплан-

татов. Schievano и соавт. использовали трехмерную модель легочного ствола для тестирования разработанного имплантируемого клапана легочной артерии [34]. J. Perreg и соавт. спроектировали и напечатали модели аорты 34 пациентов с синдромом Марфана, по которым изготавливались искусственные имплантаты для фиксации восходящей дуги аорты [35].

Моделирование гемодинамических показателей. Заболевания клапанов сердца почти всегда сопровождаются нарушениями гемодинамики. 3D-модели клапанов сердца позволяют проводить гемодинамическое моделирование различной патологии *in vitro* [36]. D. Maragiannis и соавт. и S.C. Harb и соавт. использовали 3D-модели аортального клапана с тяжелым стенозом для моделирования не только анатомических структур, но и функциональных характеристик [11, 16]. Стоит отметить, что в обоих исследованиях 3D-печать моделей клапанов осуществлялась двумя типами материалов. Твердым материалом печатались кальцинированные участки створок клапанов, а мягким — сами створки, фиброзное кольцо, дуга аорты и структуры выносящего тракта левого желудочка. 3D-модели способствовали определению точных количественных показателей кровотока, а также оценке тяжести стеноза аорты. A. Mashari и соавт. использовали 3D-печать для изготовления жестких литевых форм митрального клапана на основе данных чреспищеводной ЭхоКГ пациентам после интервенционных вмешательств. После отливки модели из гибкого силикона она имплантировалась в систему, моделирующую сердечный цикл, в которой измерялись гемодинамические показатели и площадь клапана [37].

S. Aldosari и соавт. использовали 3D-модели в настройке протоколов сканирования компьютерного томографа. В исследовании была изготовлена 3D-модель легочной артерии, в которую поместили тромботические массы и затем погрузили в слабый раствор контрастного вещества. Далее выполняли сканирование с различными параметрами. В результате удалось подобрать протокол сканирования, при котором лучевая нагрузка была снижена на 80%, без существенной потери информативности изображения [38].

К экспериментам по моделированию гемодинамики можно отнести исследование E. Vignali, в котором на 3D-принтере был изготовлен прототип левого желудочка. Особенностью данной модели являлась не только эластичность, но и система специальных каналов в стенке желудочка, которая позволяла имитировать механизм скручивания. Благодаря такому решению удалось воспроизвести ударный объем и рассчитать фракцию выброса, которая была сопоставима с физиологической. По мнению авторов, в перспективе внедрение такого прототипа даст возможность создавать модели левого желудочка для различных категорий пациентов [39].

Проблемные вопросы. Анализ статей, посвященных предоперационному планированию, показывает

отсутствие четких показаний к изготовлению 3D-моделей и их применению. Нередко можно наблюдать, что одни авторы используют 3D-модели в предоперационном планировании для подбора окклюдера ушка левого предсердия [10], в то время как другие — для планирования оперативного вмешательства у пациентов с сложными врожденными пороками (с атрезией легочной артерии, дефектом межжелудочковой перегородки и аортопальмональными фистулами) [18].

Несмотря на большое количество опубликованных работ по 3D-печати в кардиохирургии, существует дефицит исследований, посвященных предоперационному планированию. Известно, что самой частой патологией остается ишемическая болезнь сердца, некоторые формы которой требуют оперативного лечения. В качестве примера можно привести пациентов с таким осложнением трансмурального инфаркта миокарда как аневризма левого желудочка. Вероятно, это вызвано трудностью получения изображений с высокой контрастностью между нормальными и патологически измененными тканями с сохранением пространственного разрешения, что необходимо для получения качественной 3D-модели.

На сегодняшний день в подавляющем количестве работ источником данных для создания 3D-модели служит компьютерная томография с контрастированием. Нет точных данных, показывающих, что 3D-печатные модели улучшают результаты лечения у пациентов с врожденными пороками сердца, несмотря на то, что в исследованиях было показано, как такие модели изменяют используемый хирургический подход [5].

В образовательном процессе важно учитывать потенциальные ограничения самой технологии. Создаваемые высокодетализированные и точные 3D-модели внутренних органов при использовании широкого спектра материалов с различными свойствами принципиально отличаются по массе, текстуре, цвету, тактильным и другим физическим свойствам от секционных препаратов. Несмотря на возможность использования напечатанных моделей за пределами кафедры анатомии, чрезмерная зави-

симость от них может привести к ложному пониманию нюансов в изучении и обработке секционных материалов. Именно поэтому роль 3D-печати в существующей системе медицинского образования рассматривается как вспомогательная [25].

Таким образом, экономическая эффективность, процесс создания 3D-моделей и практическое применение, прежде всего в кардиологии и кардиохирургии, требуют дальнейшего изучения.

Перспективы. Развитие 3D-печати моделей сердца должно продолжаться в направлении развития имплантируемых, ориентированных на пациента, девайсов, подобно печатным титановым имплантатам, которые используются в челюстно-лицевой хирургии и ортопедии. В перспективе 3D-печать сердца может включать в себя изготовление клапанных протезов, сосудистых протезов и окклюдеров [40]. Это потребует междисциплинарного сотрудничества в широком смысле, включая рентгенологов, кардиохирургов, эндоваскулярных хирургов и инженеров [9]. Также не стоит забывать, что одной из «точек приложения» 3D-печати является биопечать [8].

В будущем 3D-модели могут быть использованы для оказания медицинской помощи при сердечно-сосудистой патологии с эффективностью, аналогичной той, которую сейчас отмечают в планировании оперативного вмешательства при врожденных пороках сердца.

Заключение. Трехмерная печать является перспективной и быстроразвивающейся технологией, имеющей огромный потенциал влияния на медицину в целом и на лечение сердечных заболеваний в частности.

Основными направлениями применения 3D-печати в кардиологии и кардиохирургии являются предоперационная подготовка, образовательный процесс, тестирование имплантируемых устройств и моделирование гемодинамических условий. Однако в настоящее время использование 3D-печати в медицине не регламентировано и не стандартизовано.

Несмотря на большое количество исследований, посвященных 3D-печати в кардиохирургии, остаются нерешенные вопросы, которые требуют дальнейшего изучения.

ЛИТЕРАТУРА/ REFERENCES

- Vukicevic M., Puperi D.S., Jane Grande-Allen K., Little S.H. Cardiac 3D printing and its future directions // *JACC Cardiovasc Imaging*. 2017. Vol. 10, No. 2. P. 171–184. DOI: 10.1007/s10439-016-1676-5.
- Коровин А.Е., Нагибович О.А., Пелешок С.А., Копыленкова Т.И., Шилин В.П., Ольховик А.Ю., Шевченко В.А. 3D-моделирование и биопрототипирование в военной медицине // *Клиническая патофизиология*. 2015. № 3. P. 17–23. [Korovin A.E., Nagibovich O.A., Peleshok S.A., Kopylenkova T.I., Shilin V.P., Olkhovik A.Yu., Shevchenko V.A. 3D-modeling and bioprototyping in military medicine. *Clinical pathophysiology*, 2015, No. 3, pp. 17–23 (In Russ.)].
- Meier L.M., Meineri M., Qua Hiansen J., Horlick E.M. Structural and congenital heart disease interventions: the role of three-dimensional printing // *Neth Heart J*. 2017. Vol. 25, No. 2. P. 65–75. DOI: 10.1007/s12471-016-0942-3.
- Багатурия Г.О. Перспективы использования 3D-печати при планировании хирургических операций // *Медицина: теория и практика*. 2016. Vol. 1, No. 1. P. 26–35. [Bagaturiya G.O. Prospects for the use of 3D printing in planning surgical operations. *Medicine: theory and practice*, 2016, No. 1 (1), pp. 26–35 (In Russ.)].
- Farooqi K.M., Cooper C., Chelliah A., Saeed O., Chai P.J., Jambawalikar S.R., Lipson H., Bacha E.A., Einstein A.J., Jorde U.P. 3D printing and heart failure: the present and the future // *JACC: Heart Failure*. 2019. Vol. 7, No. 2. P. 132–142. DOI: 10.1016/j.jchf.2018.09.011.
- Luo H., Meyer-Szary J., Wang Z., Sabiniewicz R., Liu Y. Three-dimensional printing in cardiology: current applications and future challenges // *Cardiol. J*. 2017. Vol. 24, No. 4. P. 436–444. DOI: 10.5603/CJ.a2017.0056.
- Mathur M., Patil P., Bove A. The role of 3D printing in structural heart disease: all that glitters is not gold // *JACC: Cardiovascular Imaging*. 2015. Vol. 8, No. 8. P. 987–988. DOI: 10.1016/j.jcmg.2015.03.009.
- El Sabbagh A., Eleid M.F., Al-Hijji M., Anavekar N.S., Holmes D.R., Nkomo V.T., Oderich G.S., Cassivi S.D., Said S.M., Rihal C.S., Matsumoto J.M., Foley T.A. The various applications of 3D printing in cardio-

- vascular diseases // *Curr. Cardiol Rep.* 2018. Vol. 20, No. 6. P. 47. DOI: 10.1007/s11886-018-0992-9.
9. Valverde I. Three-dimensional printed cardiac models: applications in the field of medical education, cardiovascular surgery, and structural heart interventions // *Revista Española de Cardiología (English Edition)*. 2017. Vol. 70, No. 4. P. 282–291. DOI: 10.1016/j.rec.2017.01.012.
 10. Liu P., Liu R., Zhang Y., Liu Y., Tang X., Cheng Y. 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 // *Cardiology*. 2016. Vol. 135, No. 4. P. 255–261. DOI: 10.1159/000447444.
 11. Maragiannis D., Jackson M.S., Igo S.R., Schuff R.C., Connell P., Grande-Allen J., Barker C.M., Chang S.M., Reardon M.J., Zoghbi W.A., Little S.H. Replicating patient-specific severe aortic valve stenosis with functional 3D modeling // *Circ Cardiovasc Imaging*. 2015. Vol. 8, No. 10. P. e003626. DOI: 10.1161/CIRCIMAGING.115.003626.
 12. Нагибович О.А., Свистов Д.В., Пелешок С.А., Коровин А.Е., Городков Е.В. Применение технологии 3D-печати в медицине // *Клиническая патофизиология*. 2017. Vol. 23, No. 3. P. 14–22. [Nagibovich O.A., Svistov D.V., Peleshok S.A., Korovin A.E., Gorodkov E.V. The use of 3D printing technology in medicine. *Clinical pathophysiology*, 2017, No. 3 (23), pp. 14–22 (In Russ.)].
 13. Schmauss D., Haerberle S., Hagl C., Sodian R. Three-dimensional printing in cardiac surgery and interventional cardiology: a single-centre experience // *Eur. J. Cardiothorac Surg*. 2015. Vol. 47, No. 6. P. 1044–1052. DOI: 10.1093/ejcts/ezu310.
 14. Wang J., Coles-Black J., Matalanis G., Chuen J. Innovations in cardiac surgery: techniques and applications of 3D printing // *J. 3D Print. Med.* 2018. Vol. 2, No. 4. P. 179–186. DOI: 10.2217/3dp-2018-0013.
 15. Park C.Y., Chang J.K., Jeong D.Y., Yoon G.J., Chung C., Kim J.K., Han D.C., Min B.G. Development of a custom designed TAH using rapid prototyping // *Asaio journal (American Society for Artificial Internal Organs: 1992)*. 1997. Vol. 43, No. 5.
 16. Harb S.C., Xu B., Klatte R., Griffin B.P., Rodriguez L.L. Haemodynamic assessment of severe aortic stenosis using a three-dimensional (3D) printed model incorporating a flow circuit // *Heart, Lung and Circulation*. 2018. Vol. 27. DOI: 10.1016/j.hlc.2018.05.099.
 17. Binder T.M., Moertl D., Mundt G., Rehak G., Franke M., Delle-Karh G., Mohl W., Baumgartner H., Maurer G. Stereolithographic biomodelling to create tangible hard copies of cardiac structures from echocardiographic data: *In vitro* and *in vivo* validation // *Journal of the American College of Cardiology*. 2000. Vol. 35, No. 1. P. 230–237. DOI: 10.1016/S0735-1097(99)00498-2.
 18. Ngan E.M., Rebeyka I.M., Ross D.B., Hirji M., Wolfaardt J.F., Seelaus R., Grosvenor A., Noga M.L. The rapid prototyping of anatomic models in pulmonary atresia // *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2006. Vol. 132, No. 2. P. 264–269. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2006.02.047.
 19. Noecker A.M., Chen J.F., Zhou Q., White R.D., Kocak M.W., Arruda M.J., Duncan B.W. Development of patient-specific three-dimensional pediatric cardiac models // *Asaio Journal*. 2006. Vol. 52, No. 3. P. 349–353. DOI: 10.1097/01.mat.0000217962.98619.ab.
 20. Schievano S., Migliavacca F., Coats L., Khambadkone S., Carminati M., Wilson N., Deanfield J.E., Bonhoeffer P., Taylor A.M. Percutaneous pulmonary valve implantation based on rapid prototyping of right ventricular outflow tract and pulmonary trunk from mr data // *Radiology*. 2007. Vol. 242, No. 2. P. 490–497. DOI: 10.1148/radiol.2422051994
 21. Jacobs S., Grunert R., Mohr F.W., Falk V. 3D-Imaging of cardiac structures using 3D heart models for planning in heart surgery: a preliminary study // *Interact Cardio Vasc Thorac Surg*. 2008. Vol. 7, No. 1. P. 6–9. DOI: 10.1510/icvts.2007.156588.
 22. Ma X.J., Tao L., Chen X., Li W., Peng Z.Y., Chen Y., Jin J., Zhang X.L., Xiong Q.F., Zhong Z.L., Chen X.F. Clinical application of three-dimensional reconstruction and rapid prototyping technology of multislice spiral computed tomography angiography for the repair of ventricular septal defect of tetralogy of Fallot // *Genet. Mol. Res.* 2015. Vol. 14, No. 1. P. 1301–1309. DOI: 10.4238/2015.February.13.9.
 23. Guo H.C., Wang Y., Dai J., Ren C.W., Li J.H., Lai Y.Q. Application of 3D printing in the surgical planning of hypertrophic obstructive cardiomyopathy and physician-patient communication: a preliminary study // *J. Thorac. Dis.* 2018. Vol. 10, No. 2. P. 867–873. DOI: 10.21037/jtd.2018.01.55.
 24. Valverde I., Gomez G., Coserria J.F., Suarez-Mejias C., Uribe S., Sotelo J., Velasco M.N., Santos De Soto J., Hosseinpour A.R., Gomez-Cia T. 3D printed models for planning endovascular stenting in transverse aortic arch hypoplasia: 3D cardiovascular model simulation // *Catheterization and Cardiovascular Interventions*. 2015. Vol. 85. DOI: 10.1002/ccd.25810.
 25. Lim K.H., Loo Z.Y., Goldie S.J., Adams J.W., McMenamin P.G. Use of 3D printed models in medical education: A randomized control trial comparing 3D prints versus cadaveric materials for learning external cardiac anatomy // *Anatomical sciences education*. 2015. Vol. 9. DOI: 10.1002/ase.1573.
 26. Costello J.P., Olivieri L.J., Krieger A., Thabit O., Marshall M.B., Yoo S.J., Kim P.C., Jonas R.A., Nath D.S. Utilizing three-dimensional printing technology to assess the feasibility of high-fidelity synthetic ventricular septal defect models for simulation in medical education // *World journal for pediatric & congenital heart surgery*. 2014. Vol. 5. P. 421–426. DOI: 10.1177/2150135114528721
 27. Ochoa S., Segal J., Garcia N., Fischer E.A. Three-dimensional printed cardiac models for focused cardiac ultrasound instruction // *Journal of Ultrasound in Medicine*. 2018. Vol. 38. DOI: 10.1002/jum.14818.
 28. White S.C., Sedler J., Jones T.W., Seckler M. Utility of three-dimensional models in resident education on simple and complex intracardiac congenital heart defects // *Congenit Heart Dis*. 2018. Vol. 13, No. 6. P. 1045–1049. DOI: 10.1111/chd.12673.
 29. Smerling J., Marboe C.C., Lefkowitz J.H., Pavlicova M., Bacha E., Einstein A.J., Naka Y., Glickstein J., Farooqi K.M. Utility of 3D printed cardiac models for medical student education in congenital heart disease: across a spectrum of disease severity // *Pediatr. Cardiol.* 2019. Vol. 40, No. 6. P. 1258–1265. DOI: 10.1007/s00246-019-02146-8.
 30. Biglino G., Capelli C., Wray J., Schievano S., Leaver L.K., Khambadkone S., Giardini A., Derrick G., Jones A., Taylor A.M. 3D-manufactured patient-specific models of congenital heart defects for communication in clinical practice: Feasibility and acceptability // *BMJ Open*. 2015. Vol. 5. P. e007165. DOI: 10.1136/bmjopen-2014-007165
 31. Wamala I., Brüning J., Dittmann J., Jerichow S., Weinholt J., Goubergitis L., Hennemuth A., Volkmar F., Kempfert J.. Simulation of a Right Anterior Thoracotomy Access for Aortic Valve Replacement Using a 3D Printed Model // *Innovations (Phila)*. 2019. P. 1–8. DOI: 10.1177/1556984519870510.
 32. Estai M., Bunt S. Best teaching practices in anatomy education: a critical review // *Annals of anatomy*. 2016. Vol. 208. P. 151–157. DOI: 10.1016/j.aanat.2016.02.010.
 33. Shi D., Liu K., Zhang X., Liao H., Chen X. Applications of three-dimensional printing technology in the cardiovascular field // *Internal and emergency medicine*. 2015. Vol. 10. DOI: 10.1007/s11739-015-1282-9.
 34. Schievano S., Taylor A.M., Capelli C., Coats L., Walker F., Lurz P., Nordmeyer J., Wright S., Khambadkone S., Tsang V., Carminati M., Bonhoeffer P. First-in-man implantation of a novel percutaneous valve: a new approach to medical device development // *EuroIntervention*. 2010. Vol. 5, No. 6. P. 745–750.
 35. Pepper J., Petrou M., Rega F., Rosendahl U., Goleworthy T., Treasure T. Implantation of an individually computer-designed and manufactured external support for the Marfan aortic root // *Multimed Man Cardiothorac Surg*. 2013. Vol. 2013. P. 1–8. DOI: 10.1093/mmcts/mmt004.
 36. Herrmann T.A., Siefert A.W., Pressman G.S., Gollin H.R., Touchton S.A. Jr. Saikrishnan N., Yoganathan A.P. In vitro comparison of doppler and catheter-measured pressure gradients in 3D models of mitral valve calcification // *J. Biomech Eng*. 2013. Vol. 135, No. 9. DOI: 10.1115/1.4024579.
 37. Mashari A., Knio Z., Jeganathan J., Montealegre-Gallegos M., Yeh L., Amador Y., Matyal R., Saraf R., Khabbaz K., Mahmood F. Hemodynamic testing of patient-specific mitral valves using a pulse duplicator: a clinical application of three-dimensional printing // *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*. 2016. Vol. 30. DOI: 10.1053/j.jvca.2016.01.013.
 38. Aldosari S., Jansen S., Sun Z. Patient-specific 3D printed pulmonary artery model with simulation of peripheral pulmonary embolism for developing optimal computed tomography pulmonary angiography protocols // *Quant. Imaging Med. Surg*. 2019. Vol. 9, No. 1. P. 75–85. DOI: 10.21037/qims.2018.10.13.
 39. Vignali E., Manigrasso Z., Gasparotti E., Biffi B., Landini L., Positano V., Capelli C., Celi S. Design, simulation, and fabrication of a three-dimensional printed pump mimicking the left ventricle motion // *Int. J. Artif. Organs*. 2019. Vol. 42, № 10. P. 539–547. DOI: 10.1177/0391398819856892.
 40. Byrne N., Velasco Forte M., Tandon A., Valverde I., Hussain T. A systematic review of image segmentation methodology, used in the additive manufacture of patient-specific 3D printed models of the cardiovascular system // *JRSM Cardiovascular Disease*. 2016. Vol. 5. DOI: 10.1177/2048004016645467.

Поступила в редакцию/Received by the Editor: 1.11.2019 г.

Авторский вклад:

Вклад в концепцию и план исследования — С.В.Кушнарев, И.С.Железняк, В.Н.Кравчук, С.Д.Рудь, А.В.Ширшин, И.А.Меньков, Г.Г.Романов. Вклад в сбор данных — С.В.Кушнарев, И.С.Железняк, В.Н.Кравчук, С.Д.Рудь, А.В.Ширшин, И.А.Меньков, Г.Г.Романов. Вклад в анализ данных и выводы — С.В.Кушнарев, И.С.Железняк, В.Н.Кравчук, С.Д.Рудь, А.В.Ширшин, И.А.Меньков, Г.Г.Романов. Вклад в подготовку рукописи — С.В.Кушнарев, И.С.Железняк, В.Н.Кравчук, С.Д.Рудь, А.В.Ширшин, И.А.Меньков, Г.Г.Романов.

Сведения об авторах:

Кушнарев Сергей Владимирович — врач-рентгенолог, адъюнкт при кафедре рентгенологии и радиологии с курсом ультразвуковой диагностики Федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия им. С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: s.v.kushnarev@yandex.ru; ORCID.org/0000-0003-2841-2990, SPIN-код: 5859-0480;

Железняк Игорь Сергеевич — врач-рентгенолог, доктор медицинских наук, доцент, начальник кафедры рентгенологии и радиологии с курсом ультразвуковой диагностики Федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия им. С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: igzh@bk.ru; ORCID.org/0000-0001-7383-512X, SPIN-код: 1450-5053;

Кравчук Вячеслав Николаевич — сердечно-сосудистый хирург, доктор медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой сердечно-сосудистой хирургии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И.Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 191015, Санкт-Петербург, Кирочная ул., д. 41; профессор 1 кафедры (хирургии усовершенствования врачей) Федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия им. С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: kravchuk9@yandex.ru; ORCID.org/0000-0002-6337-104X, SPIN-код: 4227-2846;

Рудь Сергей Дмитриевич — врач-рентгенолог, кандидат медицинских наук, ассистент кафедры рентгенологии и радиологии с курсом ультразвуковой диагностики Федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия им. С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: rsd@mail.ru; ORCID.org/0000-0002-3585-9793, SPIN-код: 4005-1267;

Шишин Александр Вадимович — врач-рентгенолог клиники рентгенодиагностики и ультразвуковой диагностики Федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия им. С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; магистрант факультета систем управления и робототехники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»; 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский просп., д. 49; e-mail: asmdot@gmail.com; ORCID.org/0000-0002-1494-9626, SPIN-код: 4412-0498;

Меньков Игорь Анатольевич — врач-рентгенолог, кандидат медицинских наук, заведующий отделением лучевой диагностики клиники рентгенодиагностики и ультразвуковой диагностики Федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия им. С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: i.menkov@gmail.com; ORCID.org/0000-0002-1569-2180, SPIN-код: 3868-3635;

Романов Геннадий Геннадиевич — врач-рентгенолог, кандидат медицинских наук, старший преподаватель кафедры рентгенологии и радиологии с курсом ультразвуковой диагностики Федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия им. С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: romanov_gennadiy@mail.ru; ORCID.org/0000-0001-5987-8158, SPIN-код: 9298-4494.

Уважаемые коллеги!

15 декабря 2020 года состоится Международная телеконференция **«Современные стандарты анализа лучевых изображений и принципы построения заключения»**. Мероприятие пройдет в он-лайн формате. Регистрация на мероприятие будет открыта в ноябре 2020 на сайте *anobnic.ru*.

Основные научные направления конференции:

- КТ придаточных пазух носа;
- ТЭЛА: современные критерии оценки;
- Лучевая диагностика полостных образований в легких;
- Международные стандарты диагностики вставания плаценты;
- Современные подходы к оценке рубца на матке;
- Система оценки риска злокачественности образований яичника на основе данных МРТ (AMRSS);
- Стадирование и диагностика рака эндометрия;
- МРТ диагностика рака толстой кишки;
- Лучевая диагностика деструктивных процессов в почках.

Подробная информация:

тел.: +7 (921) 956-92-55

на сайте: *anobnic.ru*