https://doi.org/10.25512/DIR.2020.14.2.01

МЕТОДИКИ СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ СЕРДЦА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЛУЧЕВЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

*С.В. Кушнарев – адъюнкт кафедры рентгенологии и радиологии с курсом УЗД[1]
А.В. Ширшин – врач-рентгенолог клиники рентгенорадиологии и УЗД[1], магистрант факультета систем управления и робототехники[3]
И.С. Железняк – д.м.н., доцент, начальник кафедры рентгенологии и радиологии с курсом УЗД[1]
В.Н. Кравчук – д.м.н., профессор первой кафедры хирургии усовершенствования врачей[1], зав. кафедрой сердечно-сосудистой хирургии[2]
С.Д. Рудь – к.м.н., доцент, преподаватель кафедры рентгенологии и радиологии с курсом УЗД[1]
В.Н. Малаховский – д.м.н., профессор, преподаватель кафедры РИР с курсом УЗД[1]
И.А. Меньков – к.м.н., заведующий отд. лучевой диагностики клиники рентгенорадиологии и УЗД[1]
Ю.А. Лошенко – врач-хирург клиники военно-полевой хирургии[1]

[1]*ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова» Минобороны России*
194044 Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, 6
[2]*ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Минздрава России*
191015 Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Кирочная, 41
[3] *ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»*
197101 Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, 49

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

- магнитно-резонансная томография (МРТ)
- компьютерная томография (КТ)
- эхокардиография
- 3D-модель сердца
- сегментация
- трехмерная печать
- медицинское прототипирование

АННОТАЦИЯ:

Введение: развитие программных и аппаратных возможностей современных вычислительных систем позволило технологии цифрового 3D-моделирования и 3D-печати в медицине (медицинского прототипирования) стать доступной для широкого круга работников здравоохранения. Коммерческое программное обеспечение, используемое для данных целей, остаётся недоступным для частных специалистов и небольших учреждений по причине высокой стоимости. Однако существуют некоммерческие приложения (в том числе с открытым исходным кодом) и низкобюджетные 3D-принтеры, которые могут быть использованы для создания медицинских прототипов.

Цель: описать этапы создания физических 3D-моделей на основе данных лучевых исследований с краткой характеристикой применяемого программного обеспечения и обзором основных типов 3D-печати, используемых в медицине.

Материалы и методы: в статье приведено описание процесса создания медицинского прототипа, который может быть разделен на три основных этапа:
1) получение набора цифровых изображений интересующей области или органа методами «объемного» сканирования (компьютерной томографии (КТ), магнитно-резонансной томографии (МРТ), 3D-ультразвуковых исследований (3D-УЗИ));
2) создание виртуальной 3D-модели на основе данных лучевой диагностики путем сегментации, полигонизации и последующего редактирования;
3) непосредственного изготовления изделия выбранной методикой 3D-печати с последующей (при необходимости) постобработкой.

Заключение: использование свободно распространяемого программного обеспечения и бюджетных 3D-принтеров позволяет получить медицинские прототипы с достаточной детализацией и физическими свойствами (цвет, прозрачность, эластичность), необходимыми для более наглядного представления анатомической структуры области интереса и проведения тренировочных хирургических манипуляций.

Для цитирования: *Кушнарев С.В., Ширшин А.В, Железняк И.С., Кравчук В.Н., Рудь, С.Д., Малаховский В.Н., Меньков И.А., Лошенко Ю.А. «МЕТОДИКИ СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ СЕРДЦА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЛУЧЕВЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ». Ж. ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ И ИНТЕРВЕНЦИОННАЯ РАДИОЛОГИЯ, 2020; 14(2):11–19.*

***Адрес для корреспонденции (Correspondence to):** Кушнарев Сергей Владимирович (Kushnarev Sergey V.) e-mail: s.v.kushnarev@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию в декабре 2019 года.

METHODS FOR CREATION OF THREE-DIMENSIONAL HEART MODELS BASED ON RADIOLOGY DATA

*Kushnarev S.V. – MD, Adjunct[1]
Shirshin A.V. – MD[1,3]
Zheleznyak I.S. – MD, PhD, professor[1]
Kravchuk V.N. – MD, PhD, professor[1,2]
Rud S.D. – MD, PhD[1]
Malakhovskiy V.N. – MD, PhD, professor[1]
Menkov I.A. – MD, PhD[1]
Loshenko Yu.A. – MD[1]

[1]*FSBMEI of HE «Kirov Military Medical Academy» of Ministry of Defense of the Russian Federation*
6, Academika Lebedeva str., St. Petersburg, Russian Federation, 194044
[2]*FSBEI of HE North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov of Ministry of Healthcare of the Russian Federation*
41, Kirochnaya str., St. Petersburg, Russian Federation, 191015
[3] *ITMO University*
49, Kronverkskiy av., St. Petersburg, Russian Federation, 197101

KEY-WORDS:

- magnetic resonance imaging (MRI)
- computed tomography (CT)
- echocardiography
- heart 3D model
- segmentation
- 3D printing
- medical prototyping

ABSTRACT:
Introduction: development of software and hardware capabilities of modern computing systems has enabled three-dimensional (3D) modeling and 3D printing technology (medical prototyping) to become available for a wide range of healthcare specialists. Commercial software used for this purpose remains unavailable to private physicians and small institutions due to the high cost. However, there are freeware applications and affordable 3D printers that can also be used to create medical prototypes.
Aim: was to describe stages of creating of physical 3D models based on medical imaging data and to highlight main features of specialized software and to make an overview of main types of 3D printing used in medicine.
Material and methods: article describes process of creation of medical prototype, that can be divided on three main stages: 1) acquisition of medical imaging, obtained by 'volumetric' scanning methods (computed tomography (CT), magnetic-resonance imaging (MRI), 3D ultrasound (3D US)); 2) virtual 3D model making (on the basis of visualisation data) by segmentation, polygonal mesh extraction and correction; 3) 3D printing of virtual model by the chosen method of additive manufacturing, with or without post-processing.
Conclusion: medical prototypes with sufficient precision and physical properties are necessary for understanding of anatomical structure and surgical crew training and can be made with use of freely available software and inexpensive 3D printers.

Введение

Анализ научной литературы демонстрирует уверенный экспоненциальный рост числа публикаций, посвященных 3D-печати, что является показателем интереса со стороны научного сообщества к данной теме **(рис. 1)**.
В медицине аддитивные технологии, в основном, применяются в стоматологии, травматологии и ортопедии, нейрохирургии. Как следствие, использованию 3D печати в данных направлениях посвящено подавляющее количество работ. Кардиохирургической же практике посвящены единичные публикации. Несмотря на тот факт, что по данным Всемирной организации здравоохранения именно сердечно-сосудистые заболевания остаются ведущей причиной смертности в мире. 3D-модели сердец используются для планирования сложных оперативных вмешательств у пациентов с врожденными пороками сердца.
В большинстве исследований описаны только результаты применения моделей в кардиохирургии, а самому процессу создания 3D-моделей не уделяется должного внимания. На наш взгляд отсутствие четкого алгоритма создания предоперационных макетов сердца является препятствием для широкого внедрения 3D-печати в отечественную кардиохирургическую практику. Кроме того, среди врачей часто встречаются мнения о «трудности процесса», «дороговизне производства», «сложности технологий» и т.д. Отчасти эти утверждения остаются верными, тем не менее существуют доступные инструменты для создания 3D-моделей сердца.

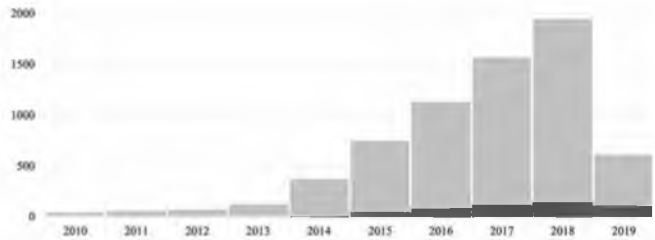

Рис.1. *Динамика публикаций научных работ, посвященных 3D-печати в медицине (серым цветом) и сердечно-сосудистой хирургии (красным цветом).*

Принципиальная технологическая последовательность создания любой 3D-модели состоит из следующих этапов: получение набора цифровых изображений области интереса или органа, создание виртуальной 3D-модели и непосредственно самой печати прототипа на 3D-принтере **(рис. 2)**.

В статье будут представлены основные этапы создания 3D-моделей сердца, рассмотрено наиболее распространенное программное обеспечение, применяемое для создания цифровых 3D-моделей, а также представлена краткая характеристика способов трехмерной печати, используемых в медицине.

Получение изображений

В подавляющем большинстве случаев создание 3D-моделей выполняется на основе серии медицинских изображений в формате DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine). Источниками таких цифровых данных являются компьютерная томография (КТ), магнитно-резонансная томография (МРТ) и трехмерная эхокардиография (ЭхоКГ) [1].

Точность будущей 3D-модели напрямую зависит от качества получаемых DICOM изображений, важнейшими характеристиками которых являются пространственное разрешение и контрастность тканей. Изначально только КТ из-за своей высокой разрешающей способности была источником получения DICOM-изображений, пригодных для проектирования и печати 3D-моделей [2]. По данным ряда авторов для создания точных цифровых 3D-моделей полученные на основе различных методов лучевой диагностики изотропные вокселы должны быть реконструированы с толщиной среза от 0,5 до 1,25 мм [3].

В настоящее время для печати 3D-моделей врожденных пороков и сосудистых аномалий сердца стало возможным применение данных МРТ-сканирования. ЭКГ-синхронизированная МРТ, как при свободном дыхании, так и при его задержке, применяется для получения изображений, пригодных для последующей сегментации и печати 3D-модели хорошего качества [3]. Также была продемонстрирована возможность реконструкции клапанных структур сердца, а именно створок митрального клапана и фиброзного кольца, при помощи метода трехмерной трансэзофагеальной ЭхоКГ [4]. Сообщалось о возможности получения 3D-моделей на основе объединенных данных, полученных методами КТ и трансторакальной ЭхоКГ, для планирования оперативного вмешательства у пациентов с патологией митрального клапана [5].

Относительно недавно появилась возможность трехмерной реконструкции плоскостных DICOM-изображений при выполнении ротационной ангиографии. Полученные изображения характеризуются высокой контрастностью и субмиллиметровой толщиной среза. Методика позволяет получить объемные изображения только полостей камер сердца и просветов сосудов, мягкотканые структуры остаются за пределами визуализации [6].

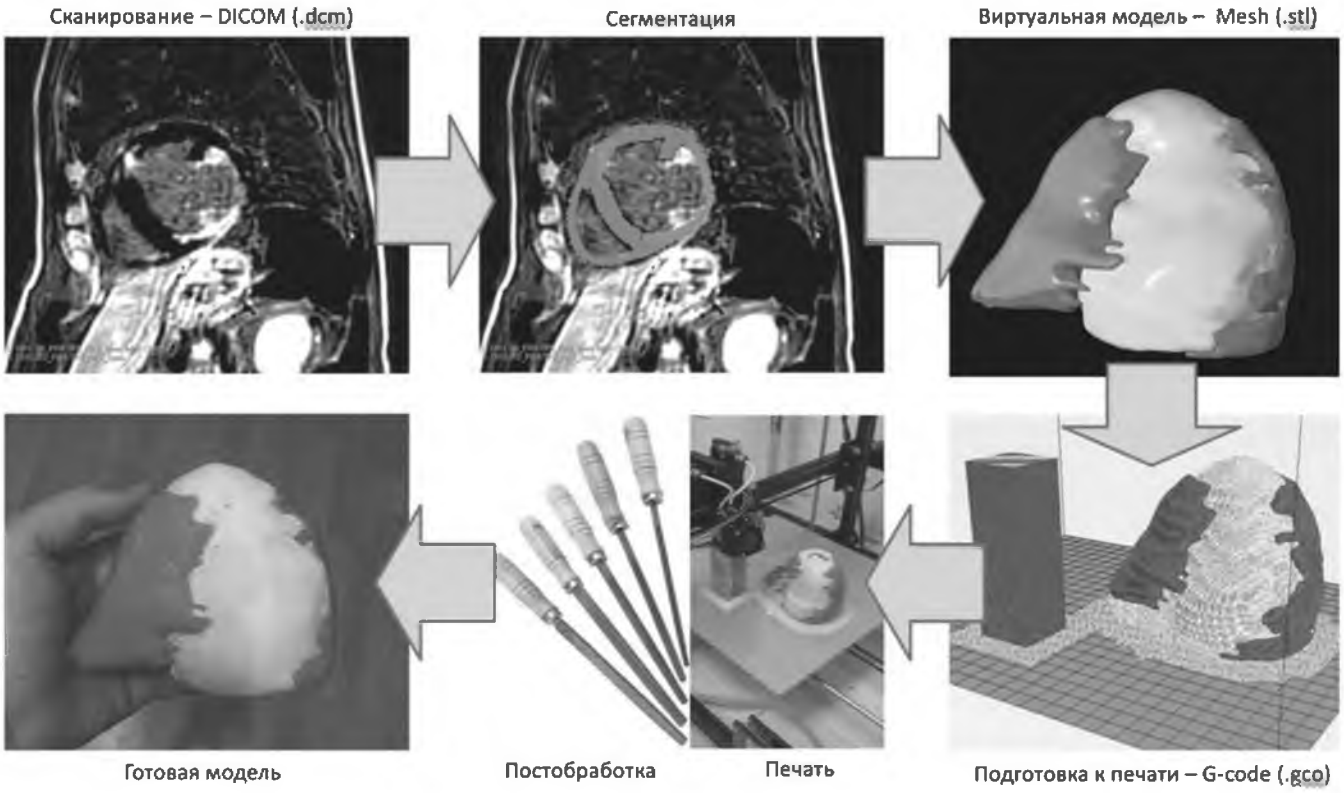

Рис.2. *Принципиальная схема этапов создания 3D-модели.*

Обработка полученных изображений

Для обработки DICOM-изображений используется специализированное программное обеспечение. Оно предназначено для выполнения следующих задач: сегментация DICOM-изображений, создание цифровой 3D-модели, сохранение ее в формате STL (Standart Tesselation Language) и ее редактирование. Формат STL содержит информацию о геометрии поверхностей объекта и его положении в пространстве. Первоначально формат использовался в системах автоматизированного проектирования CAD (Computer-Aided Design) и был принят как «стандарт» для трехмерных объектов [7].

Сегментация представляет собой процесс выделения областей интереса на двухмерных DICOM-изображениях для последующего создания цифровой 3D-модели.

В настоящее время отсутствует стандартизованный подход к сегментированию изображений. Возрастающий интерес к анатомическому моделированию и растущая потребность в персонализированных вмешательствах на сердце стимулировали эволюцию методов сегментации [2]. Существующие методы сегментации можно разделить на мануальные, полуавтоматические и автоматические. Наибольшее распространение получили следующие инструменты сегментации: определение значения пороговой яркости или пороговая бинаризация (англ. – thresholding), наращивание областей (англ. – region growing), а также редактирование зон интереса исследователем вручную.

Наращивание областей – это полуавтоматический метод, который анализирует сходство характеристик соседних вокселей с характеристиками начальной точки, установленной оператором. В случае совпадения значений они добавляются как составная часть области интереса **(рис. 3)**.

Пороговая яркость или пороговая бинаризация – это автоматический метод, представляющий собой установку диапазона значений вокселей (интенсивности для МРТ, рентгеновской плотности для КТ и т.д.). В результате воксели, попавшие в указанный диапазон на всей серии DICOM-изображений, окрашиваются определенным цветом (обозначающим создаваемую модель), не попавшие в «интервал» – не изменяют свой цвет. При данном способе сегментации возможно, например, относительно быстро получить качественную 3D-модель просветов полостей сердца и сосудов

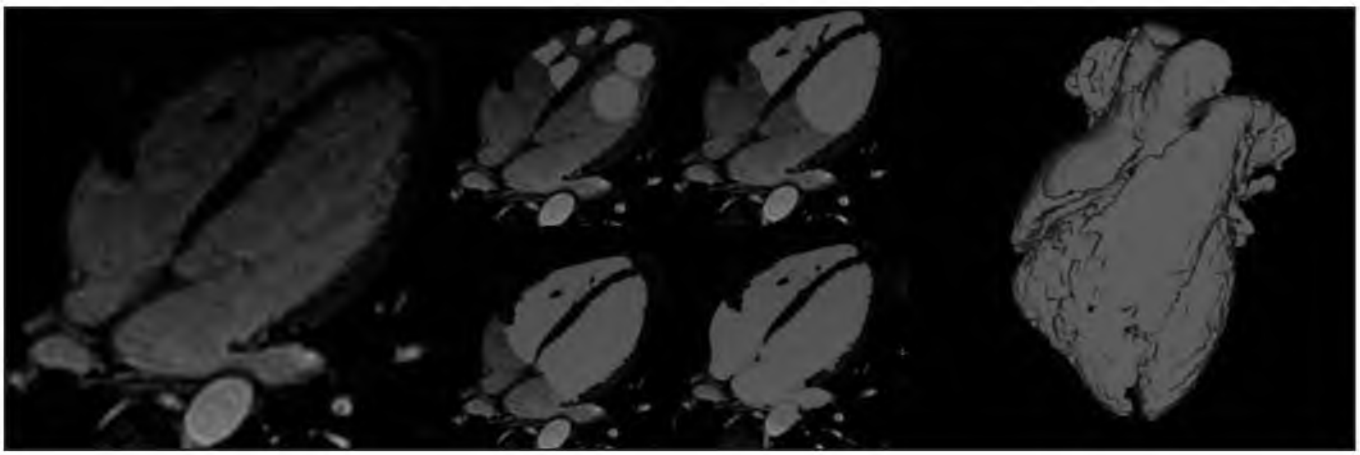

Рис.3. *Сегментация DICOM-изображений методом наращивания областей выполненная с помощью программы ITK-SNAP.*

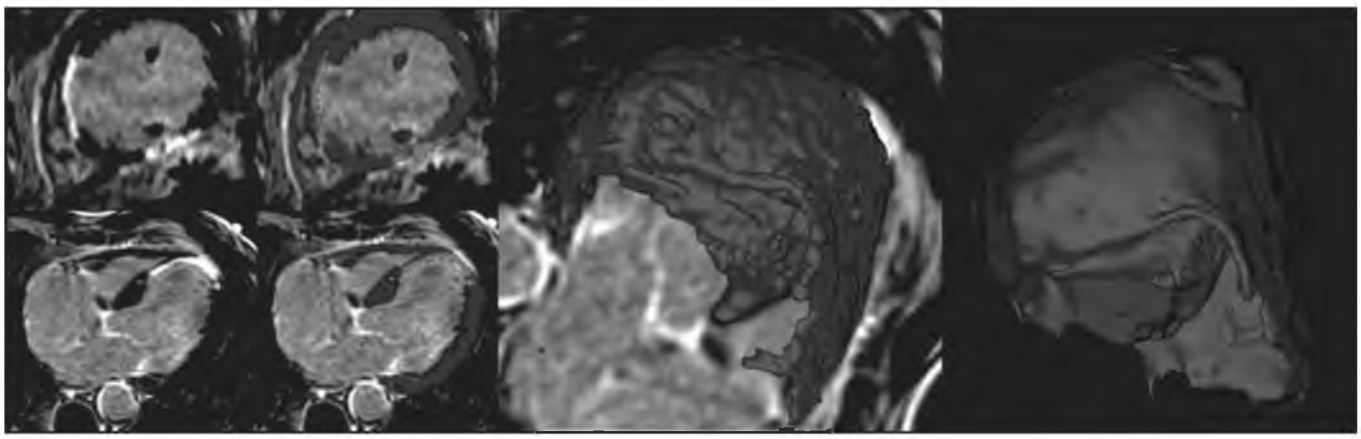

Рис.4. *Сегментация DICOM-изображений постинфарктной аневризмы левого желудочка методом пороговой бинаризацией с последующим ручным редактированием, выполненная с помощью программы 3D Slicer.*

на основе DICOM-изображений КТ-коронарографии. Ручное редактирование – метод сегментации области интереса на каждом DICOM-срезе, осуществляемый оператором самостоятельно, путем исключения или добавления вокселей к сегментируемой зоне. Данный процесс занимает много времени и напрямую зависит от опыта оператора и его квалификации. Ручное редактирование чаще всего используется в качестве дополнения к автоматическому и полуавтоматическому методам сегментации для исправления ошибок и сегментации мягких тканей сердца **(рис. 4)**.

После выделения областей интереса во всем массиве DICOM-изображений производится объемная реконструкция сегментированных участков с построением цифровой 3D-модели, которая сохраняется в формате STL [3].

Для сегментации DICOM-изображений существует достаточное количество коммерческих программных пакетов, а также бесплатных программ с открытым исходным кодом. Наиболее распространенным коммерческим программным продуктом является «Mimics» (Materialize Medical, Бельгия), который сочетает в себе методы полуавтоматической и ручной сегментации всех видов DICOM изображений. Свободно распространяемые программные пакеты «ITK-SNAP» и «3D Slicer» [3] также имеют возможность сегментации DICOM-изображений. Кроме того, существуют бесплатные версии DICOM-просмотровщиков, таких как Osirix Lite (Pixmeo, Швейцария) и HOROS (www.horosproject.org), которые имеют возможность экспорта объемных реконструкций в формат STL. Современные томографы содержат набор инструментов для сегментации изображений и создания файлов с расширением .stl непосредственно на рабочей станции **(рис. 5)**.

Полученная цифровая 3D-модель обрабатывается при помощи программ трехмерного моделирования (CAD - Computer Aided Design). Среди бесплатных решений можно воспользоваться функционалом таких программных пакетов как Blender (Blender Foundation, Нидерланды), Meshlab (ISTI-CNR, Италия). Наиболее распространенными в медицинских сообществах являются программные продукты Meshmixer (Autodesk, США), 3Matic (Materialize Medical, Бельгия), и Solidworks (Waltham, США) [8]. Набор инструментов данных программ предоставляет возможность сглажи-

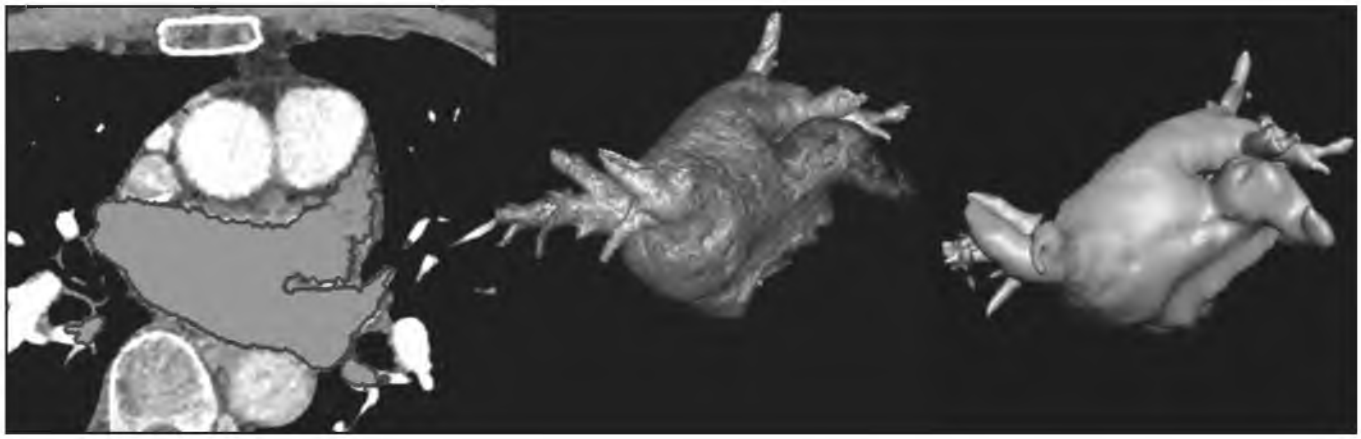

Рис.5. *Сегментация DICOM-изображений и STL-модель левого предсердия, созданная на рабочей станции компьютерного томографа GE Revolution.*

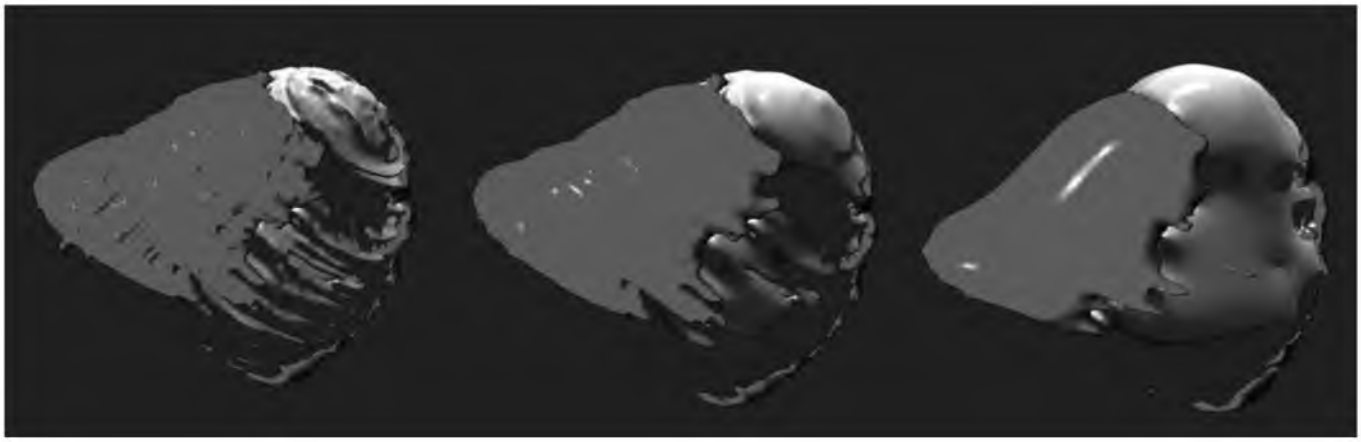

Рис.6. *Обработка цифровой STL модели в программе Meshmixer с помощью инструментов выделения, сглаживания и выравнивания.*

вания поверхностей, наращивания областей, исправления ошибок и окрашивания в различные цвета для удобства визуального восприятия или выделения нужного сегмента 3D-моделей **(рис. 6)**.

Процесс сегментации и обработки цифровой 3D-модели занимает много времени, требует навыков работы со специализированным программным обеспечением, а также понимания анатомического строения сегментируемой области [3]. Время сегментации зависит от опыта оператора и сложности модели. Например, сегментация просвета аорты может быть выполнена за 20 мин. В то время как сложная сегментация нескольких анатомических структур, которые должны быть напечатаны разными цветами, может занять более 10 часов даже у опытного специалиста [2].

Способы трехмерной печати

Все технологии 3D-печати объединены одним общим принципом – послойным «нанесением» материала на рабочую поверхность принтера с последующим формированием модели [9]. Существующие технологии 3D-печати отличаются друг от друга по типу используемого материала и способу его нанесения (фиксации). Исходя из этого 3D-печать можно принципиально разделить на лазерную и экструзионную (струйную). К лазерной относятся следующие типы: лазерная стереолитография, лазерное сплавление, лазерное спекание, к экструзионным (струйным) типам – склеивание или наплавление [10].

В медицине наибольшее распространение получили послойная печать расплавленной полимерной нитью, стереолитография, селективное лазерное сплавление порошковых материалов [11].

Моделирование методом послойного наплавления расплавленной полимерной нити (FFF - Fused Filament Fabrication или FDM - Fused Deposition Modeling) является недорогим и доступным видом 3D-печати. Термопластичный полимер попадает в печатающую головку (хотэнд), в которой происходит его нагрев до перехода в вязкотекучее состояние. Хотенд, двигаясь в трех взаимно перпендикулярных осях относительно платформы, наносит на нее разогретый полимер, формируя при этом необходимое изделие. Широкий спектр материалов, отличающихся по цвету и эластичности, позволяет получать модели с различными физическими характеристиками. Преимуществом метода FFF является относительно небольшая стоимость оборудования и расходных материалов [7].

Стереолитография (SLA, Stereolithography) является самым распространенным видом 3D-печати в медицине [12]. В качестве расходного материала используется жидкая светочувствительная смола. Ультрафиолетовый лазер послойно очерчивает геометрию объекта, инициируя переход смолы в твердое (полимеризованное) состояние в области засветки. SLA-принтеры обладают высоким разрешением в диапазоне от 0,025 до 0,1 мм и требуют минимальный объем поддерживающих структур, что обеспечивает относительную гладкость поверхности изделия после их удаления.

Селективное лазерное сплавление (SLM, Selective Laser Melting) – это технология изготовления модели из порошкообразного материала, который подвергается плавлению под воздействием лазерного луча. Порошковые материалы тонким, равномерным слоем наносятся на поверхность рабочего стола. Далее мощный лазерный луч производит сплавление гранул порошка в областях, соответствующих геометрии создаваемого изделия. После этого наносится новый слой материала, и цикл повторяется до полного изготовления модели. Данную технологию 3D-печати используют преимущественно для производства изделий из металла.

Технологию струйного моделирования (Ink Jet Modelling) в различных модификациях применяют следующие производители аддитивных установок: 3D Systems (Multi-Jet Modeling или MJM), PolyJet (Objet Geometries или PolyJet) и Solidscape (Drop-On-Demand-Jet или DODJet) [11]. Данная технология во многом схожа с принципом работы офисных струйных принтеров. На поверхность стола наносится послойно жидкая фотополимерная смола и чернила. После этого нанесенный слой фиксируется (затвердевает) под воздействием ультрафиолетового излучения, затем цикл повторяется. Данная технология позволяет получить модели различных цветов со свойствами резиноподобных или твердых изделий [7].

Технология склеивания порошков (binding powder by adhesives) сочетает в себе элементы методов струйной печати и селективного лазерного спекания. В процессе печати используются два вида материалов: крахмально-целлюлозный порошок и жидкий клеий на водной основе. Клей поступает из печатающей головки 3D принтера на тонкий слой порошка, связывая частицы последнего между собой. Далее происходит нанесение нового слоя порошка и цикл повторяется вновь, формируя контур будущего изделия.

В настоящее время существует большое разнообразие материалов, используемых для 3D-печати. Они различаются по твердости (от металла до резиноподобных материалов), светопропусканию (прозрачности) и цветовой гамме. Стоит отметить, что, выбирая материал для получения прототипа с желаемыми физическими свойствами, необходимо учитывать технологические особенности используемого 3D-принтера. Использование особенностей некоторых материалов и их комбинаций может расширить спектр применения получаемых моделей. Например, прозрачный материал позволяет хирургу видеть внутреннюю структуру и пропорции камер сердца, гибкая модель дает возможность отработать некоторые хирургические манипуляции, а наличие двух и более цветов - визуализировать распространенность патологических изменений в миокарде и их соотношение с анатомическими структурами.

Проблемные вопросы

В настоящее время существует несколько проблемных вопросов для современных технологий 3D-печати. Передача сократительной функции миокарда, а также меняющиеся объемы камер при сердечных сокращениях, ограничивают возможности создания полноценной функционирующей 3D-модели сердца [13]. Стоит отметить, что технология печати PolyJet может создавать 3D-модели, которые состоят из сегментов с разными динамическими свойствами, однако полное воспроизведение механических свойств тканей сердца еще не достигнуто [3].

Получение качественных DICOM-изображений – это первый шаг к 3D-печати. Отсутствие стандартного протокола для сбора данных при различных методах лучевой диагностики и постобработки отрицательно сказывается на качестве 3D-моделей. Выполнение сегментации DICOM-изображений занимает много времени и требует большого объема ручной работы [14]. Ошибки и погрешности во время сегментации могут влиять на точность создаваемой 3D-модели, что в свою очередь может привести к расхождению диагностических данных и параметров предоперационного макета, которое в последующем может привести к врачебным ошибкам. И наоборот, точно изготовленная 3D-модель может оказать положительное влияние на подготовку хирургической бригады к операции, которое приведет к лучшему клиническому результату [1].

Одним из проблемных вопросов является потребность в специально обученном персонале, осуществляющем цифровое моделирование. Необходимо отметить, что среди всех имеющихся специальностей, именно специалисты по лучевой диагностике обладают оптимальным базовым набором компетенций для создания виртуальных моделей органов, так как в повседневной практике постоянно анализируют лучевую анатомию пациента на основе данных томографии. Отчасти поэтому производители аппаратов для томографии в настоящее время интегрируют в свои продукты возможность выполнять сегментацию изображений и создавать STL-файлы непосредственно на рабочей станции. Таким образом, при внедрении медицинского прототипирования в повседневную клиническую практику, именно отделения лучевой диагностики способны стать основной платформой для создания соответствующих специализированных структурных подразделений.

В зависимости от сложности модели и типа используемого 3D-принтера время печати может занять более суток, что ограничивает ее применение в неотложной кардиологии и кардиохирургии.

На сегодняшний день не существует общепринятых методических рекомендаций, определяющих показания к применению и единый алгоритм создания трехмерных моделей.

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

Перспективы

С развитием технологий рынок 3D-печати изменился. Происходит снижение цен на аддитивные установки и расходные материалы к ним. Прослеживается тенденция в виде появления новых моделей 3D-принтеров с приемлемой стоимостью, которые близки по своим

Рис. 7. *Алгоритм создания 3D-моделей сердца с использованием бесплатного программного обеспечения.*

функциональным возможностям к специализированным моделям. Кроме того, программное обеспечение для сегментации изображений становится все более доступным, а его возможности постепенно расширяются.

По мере появления на рынке относительно производительных и доступных 3D-принтеров, медицинские учреждения будут способны выделять средства для печати персонализированных 3D-моделей, что станет стандартным дополнением к традиционным методам лучевых исследований [15].

Объединив технологии получения изображений сердца с высоким разрешением, программного обеспе-чения для обработки изображений и 3D-печати несколькими материалами с различными свойствами, прототипы сердца способны стать вспомогательным диагностическим инструментом. Однако на сегодняшний день как в России, так и за рубежом, юридическое и правовое регулирование находится в стадии разработки, и законодательная база, регулирующая изготовление и использование индивидуальных изделий медицинского назначения, напечатанных на 3D-принтере, не сформирована [16].

Заключение

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

Получение цифровых 3D-моделей возможно с использованием свободно распространяемого программного обеспечения, а их изготовление – на бюджетных 3D-принтерах с невысокой стоимостью расходных материалов **(рис. 7)**. Существующие технологии 3D-печати позволяют получать изделия с различными свойствами (цвет, прозрачность, твердость), необходимыми для более наглядного представления анатомической структуры и проведения тренировочных хирургических манипуляций.

Отсутствие стандартизованных подходов к получению DICOM-изображений, алгоритмам его сегментации и создания виртуальных и физических 3D-моделей, равно как и неопределенность с персоналом, ответственным за внедрение и сопровождение аддитивных технологий в клинической практике, требуют дальнейшего изучения в этой области. ■

Список литературы

1. Luo H., Meyer-Szary O., Wang Z., Sabiniewicz R. et al. Three-dimensional printing in cardiology: current applications and future challenges. *Cardiol. J.* 2017; 24 (4): 436–444.
2. Vukicevic M., Mosadegh B., Min J. K. et al. Cardiac 3D printing and its future directions. *JACC Cardiovasc. Imaging.* 2017; 10 (2): 171–184.
3. Meier L.M., Meineri ·M., Hiansen J. Q. et al. Structural and congenital heart disease interventions: the role of three-dimensional printing. *Neth Heart J.* 2017; 25 (2): 65–75.
4. Witschey W.T., Pouch A.M., McGarvey J. R. et al. Three-dimensional ultrasound-derived physical mitral valve modeling. *Ann. Thorac. Surg.* 2014; 98 (2): 691–694.
5. Vukicevic M., Puperi D.S., Grande-Allen K. J. et al. 3D Printed Modeling of the Mitral Valve for Catheter-Based Structural Interventions. *Ann. Biomed. Eng.* 2017; 45 (2): 508–519.
6. Parimi M., Buelter J., Thanugundla V. et al. Feasibility and Validity of Printing 3D Heart Models from Rotational Angiography. *Pediatr. Cardiol.* 2018; Vol. 39 (4): 653–658.
7. Abudayyeh I., Gordon B., Ansari M.M. et al. A practical guide to cardiovascular 3D printing in clinical practice: Overview and examples. *J. Interv. Cardiol.* 2018; 31 (3): 375–383.
8. Ripley B., Levin D., Kelil T. et al. 3D printing from MRI Data: Harnessing strengths and minimizing weaknesses. *J. of Magnetic Resonance Imaging.* 2016; 45 (3): 1–11.
9. Wang J., Coles-Black J., Matalanis G. et al. Innovations in cardiac surgery: techniques and applications of 3D printing. *J. 3D Print. Med.* 2018; 2 (4): 179–186.
10. Нагибович О.А., Свистов Д. В., Пелешок С. А. и др. Применение технологии 3D-печати в медицине. *Клин. патофиз.* 2017; 23 (3): 14–22.
11. Багатурия Г.О. Перспективы использования 3D-печати при планировании хирургических операций. *Мед.: теория и практика.* 2016; 1 (1): 26–35.
12. Kim G. B., Lee S., Kim H. et al. Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology. *Korean J. of Radiol.* 2016; 17(2): 182–197.
13. Shi D., Liu K., Zhang X. et al. Applications of three-dimensional printing technology in the cardiovascular field. Inter. and *Emergency Med.* 2015; 10: 769–780.
14. Byrne N., Forte M. V., Tandon A. et al. A systematic review of image segmentation methodology, used in the additive manufacture of patient-specific 3D printed models of the cardiovascular system. *JRSM Cardiovasc. Disease.* 2016; 5 (0): 1–9.
15. Valverde I. Three-dimensional printed cardiac models: applications in the field of medical education, cardiovascular surgery, and structural heart interventions. Revista Espacola de Cardiologna (English Edition). 2017; 70 (4): 282–291.
16. Карякин Н.Н., Шубняков И.И., Денисов А.О. и др. Правовое регулирование изготовления изделий медицинского назначения с использованием 3D-печати: современное состояние проблемы. *Травматология и ортопедия России.* 2018; 24 (4): 129–136.

References

1. Luo H, Meyer-Szary O, Wang Z, Sabiniewicz R, Liu Y. Three-dimensional printing in cardiology: current applications and future challenges. *Cardiol. J.* 2017; 24 (4): 436–444.

2. Vukicevic M, Mosadegh B, Min J K, Little S H. Cardiac 3D printing and its future directions. *JACC Cardiovasc. Imaging.* 2017; 10 (2): 171–184.

3. Meier LM, Meineri ·M, Hiansen JQ, Horlick EM. Structural and congenital heart disease interventions: the role of three-dimensional printing. *Neth Heart J.* 2017; 25 (2): 65–75.

4. Witschey WR, Pouch AM, McGarvey JR, Ikeuchi K, Contijoch F, Levack MM, Yushkevick PA, Sehgal CM, Jackson BM, Gorman RC, Gorman JH. Three-dimensional ultrasound-derived physical mitral valve modeling. *Ann. Thorac. Surg.* 2014; 98 (2): 691–694.

5. Vukicevic M, Puperi DS, Grande-Allen KJ, Little SH. 3D Printed Modeling of the Mitral Valve for Catheter-Based Structural Interventions. *Ann. Biomed. Eng.* 2017; 45 (2): 508–519.

6. Parimi M, Buelter J, Thanugundla V, Condoor S, Parkar N, Danon S, King W. Feasibility and Validity of Printing 3D Heart Models from Rotational Angiography. *Pediatr. Cardiol.* 2018; 39 (4): 653–658.

7. Abudayyeh I, Gordon B, Ansari MM, Jutzy K, Stoletniy L, Hilliard A. A practical guide to cardiovascular 3D printing in clinical practice: Overview and examples. *J. Interv. Cardiol.* 2018; 31 (3): 375–383.

8. Ripley B, Levin D, Kelil T, Hermsen JL, Kim S, Maki JH, Wilson GJ. 3D printing from MRI Data: Harnessing strengths and minimizing weaknesses. *J.of Magnetic Resonance Imaging.* 2016; 45 (3): 1–11.

9. Wang J, Coles-Black J, Matalanis G, Chuen J. Innovations in cardiac surgery: techniques and applications of 3D printing. *J. 3D Print. Med.* 2018; 2 (4): 179–186.

10. Nagibovich OA, Svistov DV, Peleshok SA, Korovin AE, Gorodkov EV. Appliance of 3D printing technology in medicine. *Klin. patofiz.* 2017; 23 (3): 14–22 [In Russ].

11. Bagaturiya GO. Prospects for the use of 3D printing in planning of surgical operations. *Med.: teorija i praktika.* 2016; 1 (1): 26–35 [In Russ].

12. Kim GB, Lee S, Kim H, Yang DH, Kim Y-H, Kyung YS, Kim C-S, Choi SH, Kim BJ, Ha H, Kwon SU, Kim N. Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology. *Korean J. of Radiol.* 2016; 17): 182.

13. Shi D, Liu K, Zhang X, Liao H, Chen X. Applications of three-dimensional printing technology in the cardiovascular field. Inter. and Emergency Med. 2015; 10: 769–780.

14. Byrne N, Forte MV, Tandon A, 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 Cardiovasc. Disease.* 2016; 5 (0): 1–9.

15. Valverde I. Three-dimensional printed cardiac models: applications in the field of medical education, cardiovascular surgery, and structural heart interventions. Revista *Espacola de Cardiologна (English Edition).* 2017; 70 (4): 282–291.

16. Karyakin NN, Shubnyakov II, Denisov AO, Kachko A V, Alyev RV, Gorbatov RO. Regulatory concerns about medical device manufacturing using 3D printing: current state of the issue. *Travmatol. i ortop. Ross.* 2018; 24 (4): 129–136 [In Russ].