

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ 3D-ПЕЧАТИ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ХИРУРГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

© *Георгий Отарович Багатурия*

Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет. 194100, Санкт-Петербург, Литовская ул., 2

Контактная информация: Георгий Отарович Багатурия — д.м.н., заведующий кафедрой оперативной хирургии и топографической анатомии. E-mail: geobag@mail.ru

РЕЗЮМЕ: Современные методы визуализации являются важным компонентом предоперационного планирования в пластической и реконструктивной хирургии. Цель данного обзора — представить современную информацию о возможностях и перспективах использования 3D-печати при планировании сложных хирургических вмешательств. Используя персонализированную 3D-модель в качестве шаблона, бригада хирургов тщательно отрабатывает на ней оптимальный доступ, важнейшие этапы предстоящей операции, с учетом индивидуальных анатомических особенностей строения органа, его типа кровоснабжения и иннервации. Приводятся данные авторов об успехах применения предоперационного планирования с использованием объемных моделей в кардиохирургии, в трансплантологии, в пластической и реконструктивной хирургии, травматологии, урологии и во многих других областях. Эффективность операции на 3D-модели достигается за счет полной идентичности зоны хирургического интереса с органами пациента в масштабе 1:1. При этом уменьшаются временные затраты на операцию за счет слаженной работы хирургической бригады, снижается длительность наркоза, уменьшается кровопотеря. К недостатку метода можно отнести дополнительные расходы и достаточно длительное время, необходимое для создания 3D-модели. Однако, учитывая стремительное развитие цифровых технологий, можно предположить, что в ближайшем будущем использование персонализированных 3D-моделей станет доступно и в обычной клинической практике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: планирование операций; 3D-печать; быстрое прототипирование; аддитивные технологии; методы визуализации.

PROSPECTS FOR THE USE OF 3D-PRINTING WHEN PLANNING SURGERY

© *Georgij O. Bagaturija*

Saint-Petersburg State Pediatric Medical University. Litovskaya str., 2, Saint-Petersburg, Russia, 194100

Contact Information: Georgij O. Bagaturija — MD., PhD, Head of the Department of Operational Surgery and Topographical Anatomy. E-mail: geobag@mail.ru

ABSTRACT: Modern visual techniques are an important component of the preoperative planning in plastic and reconstructive surgery. The purpose of this review is to present the latest information about the possibilities and prospects of using 3D-printing in the planning of complex surgical interventions. Surgical teams carefully perform an optimal approach and the most important stages of the forthcoming operation, using customised 3D-model as a template. Individual anatomical features of the body structure, as well as the type of blood supply and innervation are taken into account. The data on successful use of preoperative planning implementing 3D-models in cardiac surgery,

transplantation, plastic and reconstructive surgery, traumatology, urology and many other areas is analysed in this work. The effectiveness of operations using 3D-models is achieved through the complete match of the operated area to a patient's organs in the scale of 1:1. The time required for the operation is also reduced due to the well-coordinated work of surgical teams. Duration of anaesthesia and blood loss is reduced too. The disadvantage of the method may include additional costs and a quite lengthy process of creating a 3D-model. However, given the rapid development of digital technology, it can be assumed that the use of personalised 3D-models will be available in ordinary clinical practice in the near future.

KEY WORDS:: operation planning; 3D-printing; rapid prototyping; additive technology; visual techniques

Современные методы визуализации являются важным компонентом предоперационного планирования в хирургии [11, 17, 27]. Для выбора правильного доступа, последовательности и точности манипуляций на оперируемом органе необходимо знать особенности его топографии, строения, кровоснабжения и иннервации. Это достигается созданием точной копии интересующего органа в виде физической 3D-модели. Такой метод визуализации стал использоваться в передовых клиниках в качестве предоперационного планирования [14,24,31].

ЦЕЛЬ

Представить современную информацию о возможностях и перспективах использования 3D-печати для предоперационного планирования в разных областях хирургии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведен анализ литературы, включая отечественные и зарубежные источники. Представлены данные исследований, отражающие потребность в выполнении предоперационного планирования с использованием персонализированных 3D-моделей при сложных хирургических вмешательствах у взрослых и детей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

За последние годы увеличивается число сторонников применения 3D-моделирования в качестве предоперационной подготовки [26, 29, 34]. Это связано с прогрессом цифровых технологий, позволяющим за относительно короткий промежуток времени создать физическую трехмерную модель любого участка тела в соотношении 1:1. Созданная модель служит идеальным «муляжом» для изучения анатомии и отработки хирургических навыков предстоящей операции с учетом индивидуальных осо-

бенностей данной анатомической области [22]. Персонафикация строения органа достигается благодаря созданию 3D-модели на основе данных, полученных при компьютерной или магнитно-резонансной томографии [18].

В основу 3D-печати (от англ. Three-Dimensional Printing Technology) заложены принципы создания объемного изделия путем его послойного наращивания [21]. Эту технологию также называют «быстрым прототипированием», или «аддитивным производством» (от англ. additive — добавление), в отличие от так называемого субтрактивного производства, в основе которого лежит удаление части материала (фрезерование, точение и другая механическая обработка). Первооткрывателями в этой области были Altschuler в 1973 г. и Swinson в 1975 г [4], которые объединили систему автоматического проектирования (САПР), или CAD (Computer Aided Design) и систему изготовления с использованием компьютерной технологии CAM (Computer Aided Manufacture) в единое производство [32]. Система CAD/CAM, на базе которой строится производство 3D-моделей, обычно состоит из 3 модулей: 1 — сканер, сканирующий твердую модель или слепок и преобразующий их в цифровую 3D модель; 2 — программное обеспечение для дизайна, которое используется для создания цифровой модели реставрации; 3 — послойная печать модели на 3D принтере [11] (рис. 1). В отличие от производства стандартизированных продуктов, эта технология дала возможность производить персонализированные продукты, адаптированные под пользователя [20].

С годами 3D-печать совершенствовалась, становилась доступной. Она стала внедряться во все сферы производства, совершив, как пишут некоторые авторы, «промышленную революцию для цифровой эпохи». Однако система массового стандартизированного производства еще долго будет доминировать в промышленности. Технология же 3D печати востребована в тех отраслях, где есть потребность

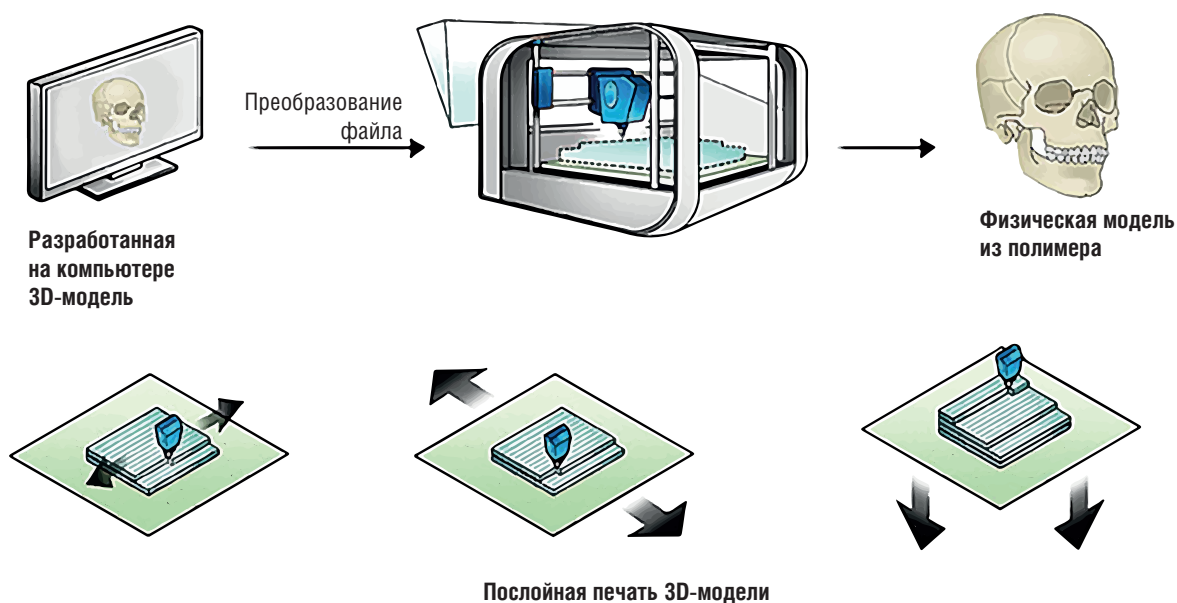


Рис. 1. Процесс 3D-печати

в персонализации или в тех случаях, когда изделия невозможно создать с помощью обычных технологий, к примеру, в аэрокосмической промышленности, в модной индустрии и медицине [9].

В медицине аддитивные технологии первыми нашли применение в ортопедической стоматологии [4]. Затем быстрое прототипирование нашло свое применение в хирургии, появились направления, связанные с заменой резецированных органов имплантами, в точности повторяющими удаленные части тела. Следующим перспективным направлением в медицине стал 3D-биопринтинг — «печати» живыми клетками на синтетическую или полисахаридную матрицу, на которую возлагают большие надежды трансплантологи [38]. Ощутимые результаты в этом направлении, возможно, будут достигнуты в ближайшие годы. В то же время некоторые авторы предостерегают от чрезмерно завышенных ожиданий от данной технологии, несмотря на значительные успехи 3D печати в медицине, указывая, что потребуются определенное время, прежде чем удастся окончательно справиться с нерешенными проблемами [8, 16, 30, 33].

Направлением, в котором технология быстрого прототипирования нашла свое применение в медицине в 1990-х годах и стремительно развивается в последние 10 лет, стало планирование хирургических операций с использованием 3D-моделей [11]. Впервые возможности трехмерной печати для планирования хирургических операций были продемонстрированы в

90-х годах прошлого столетия. Это были единичные сообщения, связанные с планированием операций и отработкой технических деталей операции на 3D-моделях в кардиохирургии [25,30], где нужна особая анатомическая точность. Единственным недостатком метода считалась слишком высокая стоимость трехмерных моделей для однократного применения, и ставился даже вопрос о целесообразности такой работы. По данным Mendez VM. 2015 [16], производство 3D хирургических моделей приводит к увеличению операционных затрат (до 4000 \$), а время сборки модели может длиться 2–3 недели. Однако, по мере удешевления технологий, 3D-планирование операций стало быстро распространяться по всему миру [25]. Сегодня этот метод применяют при планировании трудных операций по поводу аномалий развития, сложных переломов или распространенных опухолей; для того чтобы точнее рассмотреть патологический очаг из различных положений, определить локализацию опасных зон, расположение сосудов, прилегание соседних органов [19, 27].

Три независимых эксперта из Великобритании в 2014 году изучили опыт применения виртуального 3D-планирования в онкологической практике во время 220 операций у больных с опухолями головы и шеи [23]. Они отметили преимущества метода: точность реконструкции (93 %), снижение интраоперационного времени (80 %) и простоту использования (24 %).

Некоторые авторы [5, 29], сравнивая работу на 3D-модели и работу на трупе в качестве пре-

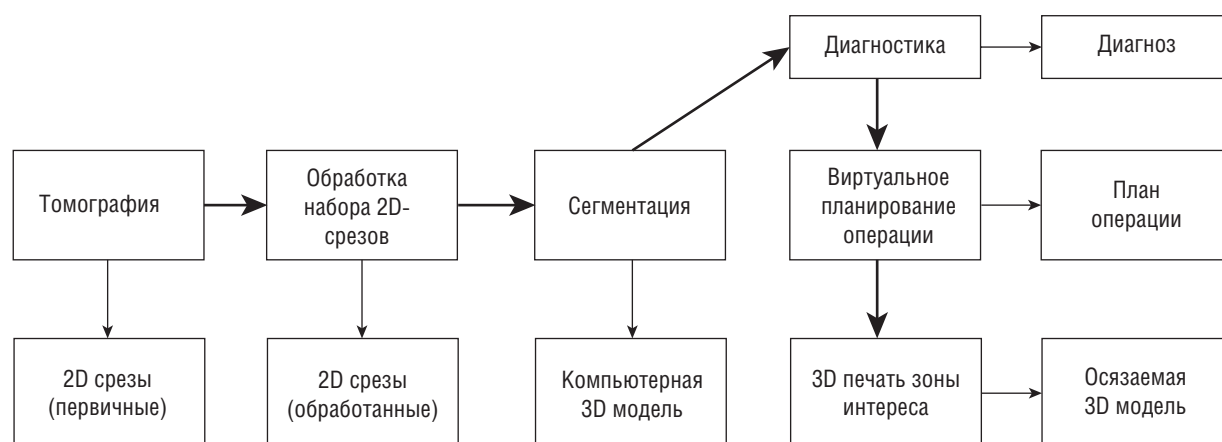


Рис. 2. Примерная схема построения 3D модели по Щаденко С. В. с соавт, 2014

дооперационной подготовки, отдают предпочтение персонализированной модели, аргументируя свое заключение тем, что на ней представлена в точности та патология, которая имеется у хирургического больного со всеми анатомическими особенностями, а также сравнительно большей доступностью и меньшей стоимостью.

Процесс изготовления медицинской 3D-модели для планирования операции состоит из нескольких этапов (рис. 2) [5].

На первом этапе происходит формирование набора медицинских изображений, которые получены при КТ или МРТ и сохраняются в виде 2D-срезов в формате данных DICOM [35]. Качество и точность реконструкции 3D-модели напрямую зависят от качества полученных первичных медицинских изображений, в связи с чем для отображения тонких деталей рекомендуется использовать компьютерный томограф или магнитно-резонансный томограф с «шагом» менее 1 мм. На втором этапе набор полученных 2D-изображений в DICOM-формате подвергается обработке с целью улучшения их качества, а именно повышения контрастности, четкости, фильтрации шумов. На третьем этапе происходит регистрация улучшенных медицинских изображений с целью их приведения к единой системе координат [1] и выполнение сегментации для формирования точной анатомической компьютерной 3D-модели. В результате математического моделирования поверхности получают цифровые воксельные модели в формате STL (Stereolithography). [13]. Преобразование DICOM-файлов в STL формат занимает около 30 минут [12]. На четвертом этапе реконструированная 3D-модель используется хирургом для детального осмотра зоны интереса с целью анализа ее геометрических размеров, синтопии, выявления аномалий и отклоне-

ний в строении. После реконструкции компьютерной 3D-модели и формирования диагноза, на пятом этапе происходит импортирование модели в CAD-систему для предоставления хирургу возможности манипулирования виртуальным изображением [32]. При необходимости, если того требует характер травмы или патологии пациента, в CAD-системе по полученной 3D-модели разрабатывается идеальная, персонифицированная 3D-модель органа. На заключительном этапе цифровая компьютерная трехмерная модель передается на принтер, который по технологии быстрого прототипирования создает персонализированную 3D-модель [18].

Существующие технологии 3D-печати отличаются друг от друга по типу прототипирующего материала и способам его нанесения. Наибольшее распространение получили такие технологии 3D-печати как стереолитография, лазерное спекание порошковых материалов, технология струйного моделирования, послойная печать расплавленной полимерной нитью, технология склеивания порошков [11].

Стереолитография (SLA, Stereo Lithography Apparatus сокращённо) — наиболее распространенный вид 3D-печати благодаря низкой себестоимости готовых изделий. При этом сканирующая система направляет на фотополимер лазерный луч, под действием которого материал твердеет. В качестве фотополимера используется хрупкий и твёрдый полупрозрачный материал, который легко склеивается, обрабатывается и окрашивается

Лазерное спекание порошковых материалов (SLS, Selective Laser Sintering) является единственной технологией 3D-печати, которая может быть использована для изготовления металлических форм. В SLS печати ис-

пользуются также керамика, порошковый пластик. Порошковые материалы наносятся на поверхность рабочего стола и запекаются лазерным лучом в твёрдый слой, соответствующий сечению 3D модели и определяющий её геометрию.

Послойная печать расплавленной полимерной нитью (FDM, Fused Deposition Modeling) — доступный вид 3D-принтинга, производится следующим образом: выдавливающая головка с контролируемой температурой разогревает до полужидкого состояния нити из АВС пластика, воска или поликарбоната и с высокой точностью подаёт полученный термопластичный моделирующий материал тонкими слоями на рабочую поверхность 3D принтера. [9].

Технология струйного моделирования (Ink Jet Modelling) имеет следующие запатентованные подвиды: 3D Systems (Multi-Jet Modeling или MJM), PolyJet (Objet Geometries или PolyJet) и Solidscape (Drop-On-Demand-Jet или DODJet), которые функционируют по одному принципу, но каждая из них имеет свои особенности. Для печати используются поддерживающие и моделирующие материалы. К числу поддерживающих материалов чаще всего относят воск, а к числу моделирующих — широкий спектр материалов, близких по своим свойствам к конструкционным термопластам. Печатающая головка 3D принтера наносит поддерживающий и моделирующий материалы на рабочую поверхность, после чего производится их фотополимеризация и механическое выравнивание. Технология струйного моделирования позволяет получить окрашенные и прозрачные модели, как мягкие резиноподобные изделия, так и твёрдые, похожие на пластики.

Технология склеивания порошков (binding powder by adhesives) позволяет не просто создавать объёмные модели, но и раскрашивать их. При этом используют два вида материалов: крахмально-целлюлозный порошок, из которого формируется модель, и жидкий клей на водной основе, проклеивающий слои порошка. Клей поступает из печатающей головки 3D принтера, связывая между собой частицы порошка и формируя контур модели. Чтобы придать модели дополнительную прочность, её пустоты заливаются жидким воском.

Все вышеописанные технологии 3D-печати применимы для операционного планирования, их выбор зависит лишь от доступности и предпочтения авторов [7].

Используя 3D модель в качестве шаблона, бригада хирургов тщательно отрабатывает на

ней важнейшие этапы предстоящей операции, с учетом индивидуальных анатомических особенностей строения органа, его типа кровоснабжения и иннервации [26,30]. Во время проведения операции трёхмерная модель служит хирургу в качестве вспомогательного средства ориентации. Эффективность операции на 3D-модели достигается за счет полной идентичности зоны хирургического интереса с органами пациента в масштабе 1:1. При этом уменьшаются временные затраты на операцию за счет слаженной работы хирургической бригады, снижается длительность наркоза. По мнению Singhal A. J. et all. 2015, при этом виде операции экономится до 2/3 времени [27].

За последние 10 лет метод предоперационного планирования с использованием персонализированных моделей нашел свое применение в кардиохирургии, в трансплантологии, в пластической и реконструктивной хирургии, травматологии, урологии и во многих других областях, о чем ниже сообщают авторы из разных стран, отмечая при этом преимущества и недостатки данного метода [3,10,12].

Кардиохирурги Санкт-Петербургского педиатрического университета в 2016 г. прооперировали младенца с аномалией Тауссиг-Бинга — редким пороком сердца, при котором от правого желудочка отходит и аорта, и легочная артерия [37]. Хирурги на 3D-модели уточнили структуру потока крови внутри сердца, спланировали все этапы хирургического вмешательства и отработали технику проведения операции. По данным детских кардиохирургов, в 20–30% подобных случаев потребуются повторная операция, если не использовать трехмерную печать (рис. 3).

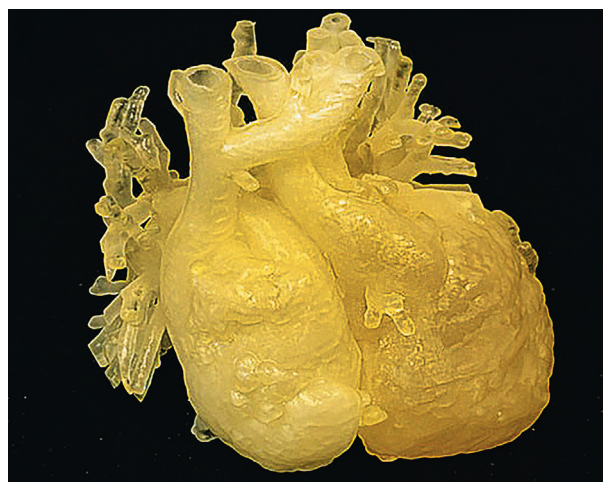


Рис. 3. Персонализированная 3D-модель сердца

Впервые в мире 3D-модель сердца было напечатана в США в июне 2013 г. [39]. Хирурги сообщили, что трехмерная модель позволила им изучить структуру сердца перед операцией двухнедельного ребенка с множественными пороками и с необычным расположением камер сердца. В дальнейшем детские кардиохирурги из Цинцинатти [40] сообщили о 20 успешных операциях на сердце, выполненных после хирургического планирования на 3D-модели сердца с использованием эластичного материала. Высокой оценки заслуживает, по их мнению, возможность запланировать вмешательство, предупредить возможные осложнения и разработать максимально эффективный подход к проведению рискованных операций. Кардиохирург Andrew Powell из Бостонского детского госпиталя Гарвардского университета [41] считает, что визуализация — это самая сложная задача, которая стоит перед кардиохирургом. Использование виртуальной или физической 3D-модели облегчает операцию, так как нет необходимости мысленно представлять строение сердца на основе двухмерных ангиограмм и эхокардиограмм. Такое планирование также помогает определить наиболее оптимальное место для установки клапанного аппарата при его замене.

Немецкие кардиохирурги из университетской клиники Мюнхена в 2008 г. выполнили трансплантацию сердца ребенку, предварительно проведя тщательное планирование операции на созданной для этой цели 3D-модели. Доктор Sodian R. et al., 2008 [28] сообщает о том, что трехмерное моделирование помогло разработать оптимальный хирургический подход к операции и значительно облегчило понимание сложной анатомии у данного пациента.

Китайские врачи из Changchun [42] в 2014 г. сообщили о проведении успешной операции на открытом сердце с использованием 3D-печати, подчеркнув при этом, что потратили в 2 раза меньше запланированного времени. Операция была с успехом проведена девятимесячному ребенку с тяжелым пороком сердца: с аномалией расположения легочных вен, не имеющих сообщения с левым предсердием, с дефектом межпредсердной перегородки. С помощью 3D-модели врачи наглядно разъяснили родителям ход сложного вмешательства. В дальнейшем модель использовалась для обучения студентов и молодых врачей.

В университетской клинике в Хельсинки [43] было проведено предоперационное планирование с применением 3D-технологий при повторной операции на сердце у пациента с атри-

овентрикулярным дефектом. Кардиологи отметили, что при таком методе планирования операция более безопасна, поскольку имеется возможность подобрать точный размер катетеров, предварительно проверив их на такой же как у пациента модели сердца с его уникальными анатомическими дефектами. Доктор Juha Sinisalo отметил преимущества такого планирования: сокращение длительности операции и существенное снижение лучевой нагрузки на пациента. Финские специалисты утверждают, что потребность в применении такого предоперационного планирования в кардиохирургии будет только возрастать. До этого случая технология 3D-печати в этой клинике с успехом применялась при планировании операций в челюстно-лицевой хирургии.

Австралийские кардиологи совместно с инженерами Мельбурнского университета в 2016 г. разработали метод 3D-печати коронарных артерий диаметром «тоньше человеческого волоса» с использованием «суперкомпьютеров» со сверхвысоким разрешением [44]. Напечатанные таким образом сосуды использовались для изготовления индивидуальных стентов, которые лучше всего подходят для каждого отдельного пациента. Профессор Barlis подчеркивает важность индивидуального планирования перед стентированием, поскольку, с его слов, «не существует двух артерий, имеющих одинаковую форму», поэтому необходимо использовать персонализированные трехмерные модели для установки пациенту наилучшего типа стента».

В Великобритании в 2015 г. провели успешную пересадку почки трехлетней девочке с применением 3D-планирования. Сообщается, что перед ее проведением были напечатаны точные трехмерные модели брюшной полости ребенка и пересаживаемого ей донорского органа. Это позволило врачам из больницы St Thomas' Hospital понять, как будет располагаться почка взрослого человека в теле ребенка. Хирург Pankaj Chandal, прооперировавший девочку, считает, что предварительная печать трехмерной модели сделала проведение сложной операции по трансплантации более безопасной — врачи были подготовлены и действовали по заранее разработанному плану [45].

Китайские хирурги детского госпиталя при университете Fudan University Children's Hospital в 2015 г. воспользовались технологией 3D-печати перед операцией разделения 12-недельных сиамских близнецов со сросшимися бедрами и нижней частью позвоночника.

Кроме того, у близнецов были общие нижние отделы кишечника. Операция по их разделению длилась пять часов и прошла успешно, чему способствовал, по мнению хирургов, оптимальный вариант проведения операции, предварительно отработанный на объемной модели [46].

Японские нейрохирурги из Saga Medical School [6] сообщили об использовании напечатанной объемной модели черепа для предоперационного планирования у 7 больных с черепно-мозговыми повреждениями. Авторы отмечали удобство использования физической 3D-модели черепа в сравнении с компьютерным графическим изображением. Хирургическое планирование с использованием физических моделей, по мнению нейрохирургов, позволяет лучше ориентироваться в сложной анатомии основания черепа и помогает снизить число хирургических осложнений.

3D-моделирование помогает проводить операции разной сложности, в том числе, исправлять челюстно-лицевые аномалии. Врачи Бостонского детского госпиталя [47] за несколько месяцев готовились к сложной операции на лице ребенка с расщелиной верхней челюсти при помощи распечатанной на 3D-принтере модели — точной копии её черепа. Сама операция, по мнению хирургов, прошла успешно с минимальной потерей времени (рис. 4).

Авторы из Южной Кореи [11] проанализировали данные более чем 500 выполненных челюстно-лицевых операций с предоперационным использованием 3D-моделей. Результаты большого числа наблюдений говорят о неоспоримых преимуществах предоперационного 3D-моделирования перед другими видами планирования. Вместе с тем подчеркивается необходимость работы над улучшением разрешающей способности принтеров для объемного моделирования и над вопросом снижения стоимости методики.

Нейрохирурги из Германии [19] сообщили о результатах операции 52 пациентов с 3D-планированием, которые были разделены на 3 группы. I группа (26 пациентов) нуждалась в корректирующей краниопластике: 1) после резекции опухолей костей (15 больных) и 2) с врожденными и посттравматическими пороками (11 пациентов); II группа (10 пациентов) нуждалась в реконструктивной краниопластике; III группа (16 пациентов) — в сложных вмешательствах в основании черепа. Модели изготавливались методом стереолитографии. Авторы отмечают уменьшение времени операции и числа операционных ошибок во всех группах, подчеркивая при этом, что трехмерные модели обеспечивают: 1) лучшее понимание анатомии, 2) интраоперационную точность лока-



Рис. 4. Отработка операции на персонализированной 3D-модели черепа

лизации поражений и 3) повышение уровня образования обучаемых.

В Санкт-Петербургском РНИИТО совместно с сотрудниками Политехнического университета в 2015 г. было выполнено протезирование тазобедренного сустава с применением компонента эндопротеза, напечатанного на 3D-принтере у пациентки с обширными дефектами костей вертлужной впадины и сложными приобретенными деформациями костей таза. При этом предоперационное планирование проводилось на модели, созданной методом селективного лазерного спекания [48].

Ученые Томского политехнического университета также помогли хирургам Томской областной клинической больницы успешно провести две операции на грудной клетке онкологическим пациентам [49]. Были созданы анатомические 3D-модели органов и опухолей, проведено планирование операции и разработка имплантата ребра из сплава никелида титана с памятью формы. Первая операция с использованием анатомических моделей была проведена пациенту с опухолью в области грудной клетки. Были удалены три ребра и произведена реконструкция реберного каркаса имплантатом из никелида титана. Во время второй операции пациенту также удалили опухоль в области грудной клетки. На стадии планирования была создана компьютерная модель имплантата ребра, максимально подходящего конкретному пациенту. Эту модель распечатали на 3D-принтере и по ней создали имплантат из сплава никелида титана, который пересадили больному.

Китайские хирурги [33] провели сравнительное исследование результатов операций у больных с поясничным спондилолистезом у 2 групп пациентов. 36 больным проводилась стандартная операция при спондилодезе, 30 пациентам — с предоперационным 3D-моделированием. Авторы не выявили существенных различий во времени операции и кровопотери между 2 группами ($p > 0,05$), показатели восстановления высоты и сагиттального угла между позвонками в опытной группе были значительно лучше, чем в контрольной группе ($p < 0,05$), что позволило сделать вывод о дальнейшем использовании данной методики, учитывая, что рентгеновская нагрузка при этом также была ниже ($p < 0,05$).

Необычное применение 3D-печати нашли британские хирурги из Great Ormond Street Hospital у ребенка с альвеолярным протеинозом легких [50]. Болезнь, как известно, требует промывания трахеобронхиального дерева под

наркозом большим объемом соляного раствора. Для отработки действий врачей, быстрого и эффективного промывания дыхательных путей, была напечатана точная резиновая копия трахеи и крупных бронхов ребенка. Авторы отмечают безопасность процедуры при таком планировании и существенное сокращение длительности наркоза.

В 2016 г. в журнале *Surgery* была опубликована обзорная статья, где группа авторов анализирует результаты исследования 158 различных хирургических операций, проведенных в стационарах с применением 3D-печати [15]. При этом трехмерная печать использовалась для разных целей: для получения анатомических моделей ($n = 113$, 71,5%) для хирургической навигации ($n = 40$, 25,3%), для создания имплантатов ($n = 15$, 9,5%) и пресс-формы ($n = 10$, 6,3%), в первую очередь в челюстно-лицевых ($n = 79$, 50,0%) и ортопедических ($n = 39$, 24,7%) операциях. Авторы отмечают, что наряду с очевидными преимуществами методики, такими как сокращение времени операции, имеются такие недостатки, как дополнительные расходы и время, необходимое для создания трехмерной модели, что до сих пор ограничивает её широкое применение в больницах.

ВЫВОДЫ

Использование 3D-печати для предоперационного планирования операций является перспективным направлением в медицине. Создание персонализированных моделей включает в себя сканирование органов на КТ или МРТ, преобразование DICOM-файлов в STL-модель с последующей печатью на 3D-принтере. Все существующие способы трехмерной печати — стереолитография, лазерное спекание порошковых материалов, технология струйного моделирования, послойная печать расплавленной полимерной нитью, технология склеивания порошков, ламинирование листовых материалов — можно применять в целях предоперационного планирования. Выбор зависит от предпочтения авторов и доступности методов. Созданные на основе КТ или МРТ 3D-модели в точности соответствуют строению органов конкретного больного с учетом только ему присущих особенностей строения и синтопии близлежащих органов [2]. Благодаря трехмерному планированию, появляется возможность персонификации модели и всесторонней визуализации зоны хирургического интереса. Обработка хирургических доступов

и приемов позволяет сократить время операции и длительность наркоза, уменьшить травматизацию тканей и кровопотерю [11]. Предоперационное 3D-планирование применяется в наиболее сложных в техническом плане случаях в кардиохирургии, челюстно-лицевой хирургии, в трансплантологии, урологии, в ортопедии. В перспективе такой метод планирования операций может стать стандартом для операций любых видов сложности у взрослых и детей.

Ряд авторов указывает на такие недостатки метода, как дополнительные расходы и время, необходимое для создания трехмерной модели [6, 11]. Однако, по мере развития технологий, есть основания предполагать, что 3D-технологии со временем будут совершенствоваться и станут более доступными в медицине. Метод безусловно перспективен, требует накопления большего опыта и дальнейшего изучения [7, 28].

ЛИТЕРАТУРА

1. Белякин С.А., Хышов В.Б., Хышов М.Б. и др. Реконструкция посттравматических повреждений костей черепа и лицевого скелета с использованием перфорированных титановых пластин и сеток. Военно-медицинский журнал: Теорет. и науч.-практ. журн. 2012. № 12: 12–17.
2. Большаков О.П. Развитие методов и направлений анатомических исследований. СПб.: Наука, 2015.
3. Дубровин В.Н., Баширов В.И., Фурман Я.А. и др. Оптимизация хирургического доступа при проведении ретроперитонеоскопической уретеролитотомии с применением компьютерной 3D реконструкции. Экспериментальная и клиническая урология. 2013, № 4: 86–89.
4. Полховский Д.М. Применение компьютерных технологий в стоматологии. Современная стоматология. 2008, № 1: 24–29.
5. Щаденко С.В., Горбачёва А.С., Арсланова А.Р. и др. 3d-визуализация для планирования операций и выполнения хирургического вмешательства (cas-технологии). Бюллетень сибирской медицины. 2014, № 4: 165–171.
6. Abe M., Tabuchi K., Goto M. Et al. Model-based surgical planning and simulation of cranial base surgery. *Neurol Med Chir (Tokyo)*. 1998;38 (11):746–50.
7. Ahmad B.A., Michelle F.G., Peter E.B. Three-Dimensional Printing Surgical Applications. *Eplasty*. 2015,14:15–37.
8. Chae M.P., Rozen W.M., McMenamin P.G. et al. Emerging Applications of Bedside 3D Printing in Plastic Surgery. *Front Surg*. 2015, 16 (2):25. DOI: 10.3389.
9. Chae M.P., Lin F., Spychal R. T. et al. 3D-printed haptic “reverse” models for preoperative planning in soft tissue reconstruction: a case report. *Microsurgery*. 2015. 35 (2):148–53. DOI:10.1002/micr.22293.
10. Chen S.T., Chang C.J., Su W.C. et al. 3-D titanium mesh reconstruction of defective skull after frontal craniectomy in traumatic brain injury. *Injury*. 2015. 46:80–85.
11. Choi J.W., Kim N. Clinical application of three-dimensional printing technology in craniofacial plastic surgery. *Arch Plast Surg*. 2015. 42 (3):267–77.
12. Dankowski R, Baszko A, Sutherland M., et al. 3D heart model printing for preparation of percutaneous structural interventions: description of the technology and case report. *Kardiol Pol*.2014;72:546–551.
13. Hoy MB. 3D printing: making things at the library. *Med Ref Serv Q*. 2013; 32 (1):94–9. DOI:10.1080/02763869.2013.749139.
14. Lee M., Wu B.M. Recent advances in 3D printing of tissue engineering scaffolds. *Methods Mol Biol*. 2012;868:257–267.
15. Martelli N., Serrano C., van den Brink H., et al. Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: A systematic review. *Surgery*. 2016;159 (6):1485–500. DOI: 10.1016.
16. Mendez B.M., Chiodo M.V., Patel P.A. Customized “In-Office” Three-Dimensional Printing for Virtual Surgical Planning in Craniofacial Surgery. *J Craniofac Surg*. 2015; 26 (5):1584–6. DOI: 10.1097/SCS.0000000000001768.
17. Michalski M.H., Ross J.S. The shape of things to come: 3D printing in medicine. *JAMA*. 2014; 312:2213–2214.
18. Mironov V., Boland T., Trusk T., et al. Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering. *Trends Biotechnol*. 2003;21:157–161.
19. Müller A., Krishnan K. G., Uhl E., et al. The application of rapid prototyping techniques in cranial reconstruction and preoperative planning in neurosurgery. *J Craniofac Surg*. 2003;14 (6): 899–914.
20. Olszewski R., Reychler H. Clinical applications of rapid prototyping models in cranio-maxillofacial surgery. In: Hoque M, editor. *Advanced applications of rapid prototyping technology in modern engineering*. Belgium: InTech; 2011;173–206.
21. Rankin T.M., Giovinco N.A., Cucher D.J., et al. Three-dimensional printing surgical instruments: are we there yet? *J Surg Res*. 2014;189 (2):193–7. doi:10.1016/j.jss.2014.02.020.
22. Rengier F., Mehndiratta A., von Tengg-Kobligh H., et al. 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2010;5:335–341.
23. Rodby K.A., Turin S., Jacobs R.J. et al. Advances in oncologic head and neck reconstruction: systematic review and future considerations of virtual surgical planning and computer aided design/computer aided modeling.

- J Plast Reconstr Aesthet Surg. 2014; 67 (9): 1171–85. DOI: 10.1016.
24. Romano P.E. 3D Printing Surgical Models of Organs; or Lunch; Phone Screens; How To Do It (3D) Yourself; Computers that Track Your Eyes and Take Eye Commands. *Binocul Vis Strabolog Q Simms Romano*. 2013;8:121–128.
 25. Schmauss D, Gerber N, Sodian R. Three-dimensional printing of models for surgical planning in patients with primary cardiac tumors. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2013;145 (5):1407–8. doi:10.1016/j.
 26. Silva D.N., Gerhardt de, Meurer E., et al. Dimensional error in selective laser sintering and 3D-printing of models for craniomaxillary anatomy reconstruction. *J Craniomaxillofac Surg*. 2008; 36:443–449.
 27. Singhal A.J., Shetty V., Bhagavan K.R., Ragothaman A., et al. Improved Surgery Planning Using 3-D Printing: a Case Study. *Indian J Surg*. 2016;78 (2):100–4.
 28. Sodian R, Weber S, Markert M, et al. Pediatric cardiac transplantation: three-dimensional printing of anatomic models for surgical planning of heart transplantation in patients with univentricular heart. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2008;136 (4):1098–9. doi:10.1016/j.jtcvs.2008.03.055.
 29. Ventola C.L. Medical applications for 3D Printing: current and projected uses. *Pharmacy and Therapeutics*. 2014; 39:704–711.
 30. Vodiskar J., Kütting M., Steinseifer U. et al. Using 3D Physical Modeling to Plan Surgical Corrections of Complex Congenital Heart Defects. *Thorac Cardiovasc Surg*. 2016 May 13. DOI:10.1055/s-0036–1584136
 31. Winder J., Bibb R. Medical rapid prototyping technologies: state of the art and current limitations for application in oral and maxillofacial surgery. *J Oral Maxillofac Surg*. 2005; 63:1006–1015.
 32. Winder J., McRitchie I., McKnight W., et al. Virtual surgical planning and CAD/CAM in the treatment of cranial defects. *Stud Health Technol Inform*. 2005;111:599–601.
 33. Wu C., Tan L., Lin X. et al. Clinical application of individualized reference model of sagittal curves by three-dimensional printing technique and computer-aided navigation system for lumbar spondylolisthesis. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi*. 2015;29 (6):734–40.
 34. Youssef R.F., Spradling K., Yoon R. et al. Applications of three-dimensional printing technology in urological practice. *BJU Int*. 2015; 116 (5): 697–702. DOI: 10.1111/bju.13183.
 35. Zinser M.J., Mischkowski R.A., Sailer H.F., et al. Computer-assisted orthognathic surgery: feasibility study using multiple CAD/CAM surgical splints. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol*. 2012;113:673–687.
 36. Zopf DA, Hollister SJ, Nelson ME, et al. Bioresorbable airway splint created with a three-dimensional printer. *N Engl J Med*. 2013;368 (21):2043–5. DOI:10.1056/NEJMcl206319.
 37. <http://medportal.ru/mednovosti/news/2016/04/06/522heart/>
 38. <http://www.bioprinting.ru/press-center/events/the-1st-international-conference-on-3d-printing-in-medicine/>
 39. http://news.xinhuanet.com/english/2015-06/12/c_134322144.htm.
 40. <http://www.news-medical.net/news/20150319/3D-printed-heart-models-to-aid-doctors-plan-for-complex-ops.aspx>.
 41. <http://www.childrenshospital.org/training-from-the-heart/spring-2015/research-focus>.
 42. http://news.xinhuanet.com/english/2016-03/17/c_135197788.htm.
 43. http://news.xinhuanet.com/english/2015-06/12/c_134322144.htm.
 44. http://news.xinhuanet.com/english/2016-02/25/c_135128599.htm.
 45. <http://medportal.ru/mednovosti/news/2016/01/27/921kidney/>
 46. <http://medportal.ru/mednovosti/news/2015/06/14/104twins/>
 47. <https://thriving.childrenshospital.org/violets-journey-3d-models-help-doctors-plan-her-surgery/>
 48. http://rniito.org/r/lechebnie_innovatsii/indatsetsistema_endo_taz_sust.html.
 49. <http://news.tpu.ru/news/2016/01/01/24497/>
 50. <http://www.bbc.com/news/health-34280641>.

REFERENCES

1. Belyakin S.A., Khyshov V.B., Khyshov M.B. i dr. Rekonstruktsiya posttravmaticheskikh povrezhdeniy kostey cherepa i litsevoego skeleta s ispol'zovaniem perforirovannykh titanovykh plastin i setok. *Voenno-meditsinskiy zhurnal: Teoret.i nauch.-prakt. zhurn*. 2012; № 12: 12–17.
2. Bol'shakov O.P. Razvitie metodov i napravleniy anatomicheskikh issledovaniy. SPb.: Nauka; 2015.
3. Dubrovin V.N., Bashirov V.I., Furman Ya.A. i dr. Optimizatsiya khirurgicheskogo dostupa pri provedenii retroperitoneoskopicheskoy ureterolitotomii s primeneniem komp'yuternoy 3D rekonstruktsii. *Ekspertimetal'naya i klinicheskaya urologiya*. 2013, № 4: 86–89.
4. Polkhovskiy D.M. Primenenie komp'yuternykh tekhnologiy v stomatologii. *Sovremennaya stomatologiya*. 2008; № 1: 24–29.
5. Shechadenko S.V., Gorbacheva A.S., Arslanova A.R. i dr. 3d-vizualizatsiya dlya planirovaniya operatsiy i vypolneniya khirurgicheskogo vmeshatel'stva (cas-tehnologii). *Byulleten' sibirskoy meditsiny*. 2014; № 4:165–171.