

## **ПРИМЕНЕНИЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ И ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ В ХИРУРГИИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)**

Николаенко А.Н.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Россия, 443099, г. Самара, ул. Чапаевская, д. 89,  
Телефон: +7 (846) 333-30-86, E-mail: [info@samsmu.ru](mailto:info@samsmu.ru)*

### **Резюме**

Настоящее исследование представляет обзор самых разных областей применения 3D-моделирования и трехмерной печати в медицине, причем количество их растет. Авторы представили обзор развития технологии быстрого прототипирования и некоторые соображения относительно начала работы в этой сфере: получение визуализации, программное обеспечение, материалы для печати, их стерилизация, финансовые и временные затраты. Как видно из растущего в последние 10 лет числа публикаций по данной теме, применение трехмерной печати в хирургии становится все более частой практикой. Авторы полагают, что это является следствием впечатляющих возможностей и большого потенциала для применения трехмерной печати, а также удешевления этой технологии. Внедрение её в клинической практике может показаться сложной проблемой, вовлекающей обязательную работу с незнакомым программным обеспечением и огромное количество способов печати. Работа междисциплинарной группы специалистов, быстрое технологическое развитие данной области, однако, могут сделать применение трехмерной печати в решении соответствующих задач крайне полезным.

Ключевые слова: аддитивные технологии, хирургия, 3D-моделирование, быстрое прототипирование, трехмерная печать.

**APPLICATION OF 3D MODELING AND THREE-DIMENSIONAL PRINTING IN  
SURGERY (REVIEW OF LITERATURE)**

Nikolaenko A.N.

*State Budget-funded Educational Institution of Higher Professional Education “Samara State  
Medical University”, Russia, 443099, Samara, Чапаевская ст., 89,  
Phone: +7 (846) 333-30-86, E-mail: [info@samsmu.ru](mailto:info@samsmu.ru)*

**Abstract**

This study provides an overview of a wide range of applications of 3D modeling and 3D printing in medicine, and the number of them is growing. The authors presented an overview of the development of rapid prototyping technologies and some considerations regarding the beginning of work in this field: obtaining visualization, software, printing materials, their sterilization, financial and time costs. As can be seen from the growing number of publications on this topic in the last 10 years, more and more practice has been observed. The authors believe that this is a consequence of the impressive opportunities and great potential for the use of three versions of the press, as well as the cheapening of this technology. Implementing it in clinical practice may seem a complex problem involving mandatory work with unfamiliar software and a huge number of printing cases. The work of an interdisciplinary team of specialists, the accelerated development of this field, however, can make use of 3D printing in solving the corresponding problems.

Key words: additive technologies, surgery, 3D-modeling, rapid prototyping, three-dimensional printing.

Хирурги все чаще применяют технологию трехмерной печати в различных ситуациях планирования и осуществления оперативного вмешательства. Практически каждый человеческий орган, который рассматривается для хирургического лечения,

может быть воспроизведен посредством 3D печати в виде трехмерной модели. Печатаются не только индивидуальные анатомические модели, но и индивидуальное медицинское оборудование: имплантаты, протезы, аппараты внешней фиксации, шины, хирургические устройства и шаблоны. Быстрый рост популярности 3D-печати подтверждает большой потенциал этой технологии и возможности ее применения в хирургии [1].

Идея применения трехмерных медицинских изображений, а именно данных компьютерной томографии, для воссоздания физической модели впервые была предложена в 1979 году [1]. В то время еще не существовало систем 3D-печати, однако присутствовала возможность субтрактивной обработки материалов, или фрезерования. До появления 3D-принтеров основным способом изготовления уникальных деталей была обработка заготовок на станках с числовым программным управлением. На таком станке компьютер управляет инструментами, необходимыми для изготовления детали: токарным, фрезерным и шлифующим инструментом. Процесс изготовления начинался с заготовки, которой постепенно придавалась требуемая форма. Однако окончательная доводка детали выполняется вручную. Первая анатомическая модель, созданная с использованием методов медицинской визуализации, была изготовлена в том же 1979 году: это была модель таза из полистирола. По мере того, как в конце 1980-х стали появляться коммерческие образцы 3D-принтеров и все чаще стали использоваться технологии трехмерной визуализации, всерьез стал рассматриваться вопрос о применении 3D-печати в медицине. Стереолитография (Steriolithography Apparatus – SLA) — технология, в которой управляемый компьютером луч лазера применяется для отверждения жидкого полимера или смолы, послойно создавая требуемую структуру. SLA стала первой доступной технологией 3D-печати, которая была применена в биомедицине в 1994 году [2]. Ортопедическая хирургия, стоматология и челюстно-лицевая хирургия стали первыми областями медицины, в которых стала использоваться эта технология. Причина этого заключается в том, что 3D-печать больше подходит для создания твердых предметов, а первые 3D-принтеры печатали только твердыми материалами. Согласно проведенному нами обзору литературы, в настоящее время опубликованы исследования применения 3D-печати практически во всех областях хирургии.

Быстрое прототипирование — технология аддитивного производства, подразумевающая создание требуемой детали послойно: «снизу-вверх». Впервые она была применена в конце 1980-х. Данная методика позволяла использовать в

промышленности функциональные и точные системы автоматизированного проектирования (САПР) [3]. Технология позволяла в сжатые сроки изготовить деталь, точно воспроизводящую инженерный чертеж. При необходимости внесения изменений в прототип изделия, инженер корректировал цифровой чертеж, после чего получалась модифицированная деталь. Технологию быстрого изготовления прототипов (отсюда ее название – «быстрое прототипирование») приняла на вооружение авиационная и автомобильная промышленность. В 1987 году был представлен первый коммерческий 3D-принтер, что значительно повысило доступность быстрого прототипирования. Недавно появились еще более доступные 3D-принтеры для любительского использования и для малого бизнеса – их стоимость в разы дешевле промышленных систем, однако они позволяют реализовывать оригинальные инженерные идеи. Вышедший в 2014 году фильм «Print the Legend» («Принтер будущего») демонстрирует рост популярности доступной 3D-печати.

Применительно к медицине быстрое прототипирование и 3D-печать требуют работы междисциплинарной группы. Большинство хирургов не знакомы с технологиями, используемыми в 3D-печати, а для работы даже с самыми доступными принтерами требуется инженерная подготовка в области САПР. В настоящем исследовании будет предпринята попытка обобщить существующие на сегодняшний день сферы применения 3D-печати в хирургии, а также предоставить сведения, полезные специалистам, желающим внедрить 3D-печать в свою практику.

Неотъемлемой частью 3D-печати является цифровое трехмерное изображение. Наиболее часто для их получения применяются компьютерную и магнитно-резонансную томографию. При этом для 3D-печати используют и другие способы получения трехмерного изображения: КТ с коническим лучом, томографическая ангиография, МР-ангиография, позитронно-эмиссионная томография, МР-холангиопанкреатография, 3D-эхокардиография, системы лазерного сканирования и даже фотографии, сделанные при помощи смартфона [3]. Даже простые рисунки и физические модели можно преобразовать в трехмерное цифровое изображение требуемой детали. Кроме того, для создания уникальных моделей возможно сочетание цифровых данных из разных источников. Gillaspie в 2016 году совместил данные компьютерной и позитронно-эмиссионной томографии для создания моделей, демонстрирующих физиологическую активность и анатомию. Его же группа визуализировала и выполнила трехмерную печать в динамике, продемонстрировав реакцию опухоли на индукционную терапию. Авторы называют этот

метод «5-мерной печатью», поскольку к трехмерной модели добавлены время и физиологическая активность [4].

Процесс трехмерной печати неразрывно связан с работой программного обеспечения: 3D-принтеру необходимо получить в цифровом виде модель, которую нужно напечатать. Эта информация может быть получена при помощи методов трехмерной медицинской визуализации. В зависимости от конкретной ситуации, алгоритм создания цифровой трехмерной модели может варьироваться. Последовательность действий адаптирована из работы Lambrecht [5], т.к. данное программное обеспечение наиболее часто применяется в трехмерной печати и в других методологиях получения пространственного изображения [6]. Следует отметить, что для трехмерной печати существует бесплатно распространяемое программное обеспечение с открытым кодом; его применение для изготовления медицинских инструментов было описано Fuller [7]. Ниже перечислены основные этапы подготовки файла, пригодного для использования 3D-принтером.

I. Сбор данных: построение цифровой модели либо «с нуля» в САПР, либо при помощи системы получения трехмерных изображений. При создании анатомической модели, как правило, используются данные КТ или МРТ, причем набор данных сохраняется в файле формата DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine – цифровое изображение и коммуникации в медицине).

II. 3D-визуализация: имеющиеся данные в формате DICOM используются для расчета пространственного соотношения объекта. Для этого применяют разные программы, например, программное обеспечение *accuitomo* (i-Dixel images, Япония).

III. Создание 3D-модели из первоначально полученных двухмерных слоев, сегментирование изображения. Получение трехмерной модели из набора слоев выполняется программным обеспечением в автоматическом режиме. Сегментирование изображения — это выделение анатомических частей на изображении, процесс, требующий от пользователя понимания конкретной области анатомии. Для сегментации чаще всего применяется программа MIMICS (Интерактивная система управления изображениями фирмы Materialise, Бельгия). Набор данных экспортируется в формат STL, поддерживаемый всеми доступными 3D-принтерами [8].

IV. Подготовка геометрической поверхности: на данном этапе виртуальная модель является грубой и подлежит сглаживанию. Может проводиться и другая обработка

поверхности: проверка на наличие и коррекция обнаруженных пересекающихся поверхностей, упрощение файла для повышения эффективности печати.

V. Печать.

В настоящее время применяется несколько техник быстрого прототипирования, их краткое описание приводится в таблице 1.

Помимо упомянутых в таблице аддитивных технологий, следует помнить и о субтрактивном производстве. В отличие от первого, при котором подразумевается селективное нанесение материала для построения модели, в последнем используется фрезерование, удаление материала из заготовки (выполненной, как правило, из полистирола). В субтрактивном производстве используются менее дорогостоящие материалы, но аддитивное производство превосходит его с точки зрения геометрической точности и разнообразия сфер применения. При фрезеровании внутренняя структура модели всегда остается сплошной. Применяя быстрое прототипирование, проектировщик контролирует внутреннюю структуру изделия. Это важно, например, при разработке хирургического инструмента. Было установлено, что инструмент с сотовой внутренней структурой прочнее инструмента, изготовленного из сплошной заготовки. Кроме того, контроль внутренней структуры модели позволяет проектировать изделие, изготовление которого потребует меньше материала и времени [9].

Таблица 1. Основные технологии трехмерной печати

Технология	Описание	Материалы	Толщина слоя, мм
Селективное лазерное спекание (SLS)	Для спекания/сплавления мелкодисперсного термопластичного порошка (поликарбоната, нейлона) в слое, для формирования модели, используется CO <sup>2</sup> лазер.	Термопластики, керамика, металлы	0,004–0,006
Прямое лазерное спекание металла	Технология подобна SLS. Разработана компанией EOS GmBH (Планнегг, Германия). При помощи лазера спекается металлический порошок.	Сплав бронзы, сталь, нерж. сталь, титан, алюминий, кобальт, никелевый сплав	0,0008–0,0012
Стереолитография (SLA)	Применяется ультрафиолетовый лазер и подвижная платформа,	Эпоксидная смола и акриловый	0,002

Технология	Описание	Материалы	Толщина слоя, мм
	находящаяся в баке со смолой: лазер полимеризует смолу слой за слоем по мере того, как платформа погружается глубже в бак.	фотополимер	
Послойное наложение расплавленной нити (FDM) – также называется свободной формовкой или экструзией	Разработана компанией Stratasys Inc. (Эден Прэйри, США). Послойное наложение расплавленного термопластичного материала.	Акрилонитрил-бутадиен-стирол, воск, поликарбонат, полипропилен, полиэферы	0,007
Многоструйное моделирование	Разработана в Массачусетском технологическом институте. При помощи сопл, подобных соплам струйного принтера, на керамический или металлический порошок распыляют жидкий связывающий компонент и получают тонкий слой твердого материала. После изготовления модели ее запекают в печи и пропитывают металлом для получения изделия требуемой плотности. Для создания детали из композитного материала используют два сопла. Композитный материал может использоваться для печати функциональных изделий; также один из материалов может выполнять поддерживающую роль в сложных моделях. Как правило, при последующей обработке	Пластик	0,016

Технология	Описание	Материалы	Толщина слоя, мм
	поддерживающая структура удаляется. Дальнейшая доработка выполняется вручную или химическими способами.		
Многоструйная печать	Сходна с многоструйным моделированием, однако допускается применение разнообразных материалов. Обеспечивает более простую финишную обработку.	Фотополимеры	0,00063

Наиболее часто применяемые в трехмерной печати материалы перечислены в таблице 1, однако изготовители коммерческих 3D-принтеров предлагают варианты этих материалов, отличающиеся цветом, плотностью, гибкостью, текстурой, долговечностью и прочностью на разрыв. Конечно, материалов, потенциально пригодных для использования очень много. Помимо уже упомянутых, в трехмерной печати применяются и новые материалы: так, в исследовании Okumoto, рассматривалась печать моделей челюстно-лицевых костей из соли на трехмерном струйном принтере. Целью работы было создание трехмерной напечатанной модели кости, точно воспроизводящей тактильные ощущения при препарировании человеческой кости. Исследователи обнаружили, что модель, напечатанная солью, точно воспроизводила тактильное ощущение [10].

Озабоченность вызывает стерильность изготовленной модели. Отметим, что большинство материалов, применяемых в трехмерной печати, совместимы с методами стерилизации хирургического инструмента, указанными Центром контроля и профилактики заболеваний США, такими, как стерилизация паром, стерилизация при низкой температуре перекисью водорода, надуксусной кислотой и этиленгликолем. К примеру, полимер молочной кислоты является термопластичным материалом, но обладает высокой температурой плавления (250°C) и, следовательно, может быть подвергнут стерилизации паром (121°C) [11]; кроме того, было показано, что напечатанные модели из данного полимера успешно стерилизуются погружением в глютаральдегид. Но следует помнить, что для некоторых материалов существуют ограничения — некоторые термопластичные полимеры обладают чрезвычайно низкой температурой плавления. С учетом диапазона доступных для печати материалов, совместимых с техниками



стерилизации, и с учетом многочисленных примеров интраоперационного использования напечатанных на 3D-принтерах моделей — их стерилизация не является препятствием к применению в хирургии, несмотря на некоторые лимитирующие физические параметры отдельных материалов.

Большую озабоченность вызывает стерилизация имплантатов. Качественная стерилизация материалов, используемых в имплантации возможна, однако она может стать определенным препятствием с точки зрения исполнения требований «регулятора». Предполагалось, что имплантируемые устройства должны индивидуально проходить валидацию после консультации с Управлением по надзору за продуктами питания и лекарственными средствами США. Разнообразие материалов и моделей может стать определенной проблемой, так как в некоторых исследованиях упоминается стерилизация материалов, которые традиционно не имплантируются [12]. Более того, наличие этой проблемы отрицается при трехмерной печати имплантатов из металла, а именно такие рассматриваются в большинстве исследований.

Время от времени возникают ситуации, в которых требуется применение материала, не совместимого с 3D-печатью, но необходимого в цикле САПР. Проблема может быть решена путем печати модели требуемого имплантата и ее использования с целью приготовления формы для отливки. Затем, в данной форме может быть создан имплантат из требуемого материала.

Срок действия большинства патентов на системы трехмерной печати уже истек, поэтому стоимость систем постепенно снижается. На платной основе предлагается использование услуг 3D-печати, что может стать экономичным решением для изготовления небольших партий изделий. Для изготовления крупных партий целесообразной может стать покупка печатной системы. Несмотря на то что стоимость принтера и программного обеспечения высока, цена в пересчете на одно изделие может оказаться относительно низкой. Системы трехмерной печати, применяемые в хирургии, могут стоить от 2000 долларов за систему начального уровня (системы FDM, SLA и PolyJet), и до 150000–900000 долларов за максимально точные системы SLS, FDM, SLA и PolyJet. Не так давно на сайте краудфандинговых инициатив «kickstarter» был открыт проект по финансированию SLA 3D-принтера за 100 долларов. Стоимость программного обеспечения, в зависимости от пакета, колеблется от 500 до 10000 долларов. Авторы уже упоминали о наличии и практике применения бесплатного программного обеспечения с открытым кодом. Стоимость материалов также различна. В подтверждение этому есть

данные об изготовлении хирургических ретракторов для применения в армии и на флоте: использовался полимер молочной кислоты, печать осуществлялась методом наплавления, стоимость одного ретрактора составила 46 центов. Печать с применением металла является более дорогой. Группа исследователей из Ирландии затратила 1200 долларов на печать костодержателя из нержавеющей стали [13].

Процесс 3D-печати может оказаться длительным, особенно в части обработки трехмерных изображений и/или разработки цифровых моделей в САПР. Усовершенствование программного обеспечения и автоматизация работы упрощают и оптимизируют этот процесс. Кроме того, недавние исследования показали, что усилия, затраченные на трехмерную печать, оправдываются ее результатом. Отметим, что экономия 10 минут в операционной «стоит» столько же, сколько 1 час изготовления модели на трехмерном принтере. Прямые преимущества для пациента (меньшее количество времени под анестезией, снижение кровопотери, лучшие результаты оперативного вмешательства) практически бесценны [4].

С 2013 года частота применения 3D-печати в хирургии возрастает экспоненциально. Увеличилось и количество вариантов применения этой технологии. В ранних исследованиях предлагается выделить три категории применения трехмерной печати: (I) изготовление анатомических моделей; (II) изготовление имплантатов и протезов; (III) изготовление хирургических инструментов.

Изготовление анатомических моделей — наиболее часто встречающаяся область применения 3D-печати в хирургии. Трехмерная печать анатомических моделей преследует две цели: предоперационное планирование и обучение специалистов, причем в предоперационном планировании модели используются чаще. В большинстве исследований 3D-печать рассматривалась в качестве ценного инструмента, как для планирования вмешательства, так и для обучения хирургов-интернов и студентов.

Трехмерная печать значительно повлияла на процесс предоперационного планирования. Напечатанные модели используются для демонстрации важных анатомических структур, симуляции оперативного вмешательства, предварительного подбора формы хирургических инструментов или их испытания. Изучение анатомии пациента с использованием муляжа требуемых структур реального размера обладает очевидными преимуществами перед просмотром изображений на экране компьютера. В недавнем исследовании проводилось сравнение напечатанных трехмерных моделей с трехмерными изображениями для предоперационного планирования. Респондентам

(хирургам-интернам) предложили разработать и сравнить виртуальные и напечатанные на принтере трехмерные модели, и на их материале выработать предоперационный план. Интерны, работавшие с напечатанными 3D-моделями, составили план более высокого качества. Авторы исследования пришли к выводу о том, что использование напечатанных трехмерных моделей может повысить качество предоперационного планирования для начинающих хирургов и повысить навыки опытных врачей за пределами операционной. Рассмотрим, как анатомические модели применяются разными хирургами в планировании операции [14].

Для планирования операций нейрохирурги используют анатомические модели сложных деформаций основания черепа и краниовертебрального перехода [15]. В хирургии позвоночника модели используют для коррекционных операций у пациентов-подростков со сколиозом. Применение напечатанных анатомических моделей для пациентов со сколиозом, новообразованиями первого шейного позвонка и атлантоосевым смещением показало эффективность в части уменьшения времени операции и объема кровопотери [16].

В сосудистой хирургии печатаются индивидуальные модели аневризмы чревного артериального ствола, модели аорты конкретных пациентов для разметки фенестрации трансплантата при размещении ветвей сосудов. Кроме того, были разработаны способы печати моделей всей аорты, максимально отражающих анатомию пациента. В последнем случае для создания анатомически корректной модели перед печатью цифровым способом удалялась кальцинозная бляшка [17].

Широко используются трехмерные модели при планировании кардиоторакальных операций. Опубликованы примеры печати анатомических моделей пациентов для планирования операций по коррекции врожденных пороков сердца (транспозиция магистральных сосудов, дефект межжелудочковой перегородки, стеноз легочной артерии), а также для коррекции двойного отхождения сосудов от правого желудочка [18]. Используются модели для подготовки к другим операциям: резекция опухоли сердца, иссечение перегородочной мышцы, пересадка сердца в педиатрии у пациента с одножелудочковым сердцем, коррекция внутрисердечных дефектов, резекция эктопической тимомы, полная замена аортальной дуги, эктомия субсегмента легочной артерии, резекция при раке легких, операции при комплексной пищеводной патологии. Использование трехмерной печати в кардиоторакальной хирургии доказало свое преимущество при работе с пациентами с aberrантной анатомией сосудистой системы. В

некоторых случаях выполнялась стерилизация анатомической модели, после чего она использовалась для анатомического ориентирования во время операции. Одна группа исследователей подготовила и использовала в процессе хирургического вмешательства по замене аортального клапана модель сосудистой системы пациента, ранее перенесшего аортокоронарное шунтирование [19].

В гепатобилиарной хирургии трехмерная печать используется для изучения анатомических вариантов до проведения операции. Группа исследователей подготовила модель печени пациента (в натуральную величину): на модели была показана опухоль и рассмотрены варианты сосудистой системы до проведения резекции печени. Кроме того, трехмерные модели применялись для интраоперационной идентификации опухолей печени, которые не были видны при ультразвуковом исследовании. При проведении трансплантаций показало эффективность предоперационное сравнение анатомии сосудистого тракта и желчных протоков живого донора и реципиента [20].

Планирование операций для пациентов с редкой или аномальной анатомией — еще одна область применения трехмерных моделей, на этот раз в ортопедии. Так, планирование операций по ревизионной дискотомии в поясничном отделе позволило сократить время операции и кровопотерю во время операции. Кроме того, трехмерные модели применялись при планировании коррекции обширной лопаточной остеохондромы, в тазовой хирургии, при хирургической коррекции вторичной нестабильности плечевого сустава [21, 22].

Трехмерная печать анатомических моделей применяется в урологии: при планировании операций по частичной резекции надпочечника, частичной резекции почки при удалении опухолей, а также для информирования пациентов об анатомии почки и опухоли до операции [22].

В стоматологии и челюстно-лицевой хирургии трехмерная печать моделей применяется при коррекции глазного гипертелоризма и реконструкции челюсти. В черепно-лицевой хирургии напечатанные модели используют для предоперационного проектирования лоскута при лечении синдрома Парри-Ромберга и планирования пластики расщепленной кости свода черепа [23].

Напечатанные трехмерные анатомические модели позволяют хирургу не только точнее оценить анатомию пациента, но и провести симуляцию хирургического вмешательства до операции, отработав манипуляции с учетом индивидуальной анатомии

пациента. Это особенно важно при планировании операций для пациентов со сложным или редким заболеванием [24, 25].

Так, опубликованы исследования о симуляции патологий с использованием 3D-моделирования при подготовке к кардиоторакальным операциям по поводу комплексного обструктивного порока дуги аорты, при подготовке к эндоваскулярному стентированию при гипоплазии дуги аорты [26]. Модели изготавливаются также для симуляции чрезкатетерного протезирования клапанов, вмешательств на дыхательных путях, например, для симуляции постановки интубационного стента [27].

Опубликованы исследования об использовании индивидуальных моделей при симуляции операций в детской хирургии: лапароскопическое удаление кисты жёлчного протока, торакоскопическое удаление доли легкого [28]. Авторы исследований полагают, что предоперационная симуляция является ценным инструментом, в частности, при обучении интернов, как в клинической практике, так и при самостоятельной работе.

В хирургии печени и жёлчных протоков используются модели системы сосудов печени для симуляции этапов операции по резекции холангиокарциномы, а также по резекции гепатобластомы у ребенка [29].

В трансплантационной хирургии модели используются для симуляции и планирования операции по пересадке доли легкого и почки. Перед пересадкой доли легкого изготавливаются модели легочной сосудистой системы донора и реципиента, а перед операцией проводится симуляция анастомоза всех сосудов. В случае пересадки почки перед операцией изготовили муляж всей полости малого таза [30].

При планировании таких ортопедических операций, как постановка интрамедуллярного штифта при сильно искривленной бедренной кости или многооскольчатом переломе длинной трубчатой кости — симуляция на индивидуальных моделях также показала свою целесообразность [31].

Трёхмерная печать применяется в оториноларингологии: изготавливаются модели височной кости для симуляции отологических операций; изготавливаются модели перстневидного хряща, которые практически полностью воссоздают физические характеристики человеческого перстневидного хряща *in vivo*, причем последние применяются для оценки вероятности разрыва хряща при проведении процедуры баллонной дилатации [16].

Напечатанные модели применяются в пластической хирургии: с их помощью проводится симуляция восстановления структуры ушной раковины при лечении

микротии. Изготовленные на принтере модели реберного хряща оказались более репрезентативными при воссоздании геометрии ребра у детей, чем имевшиеся на момент исследования симуляции [32] [24].

Трехмерные модели, изготовленные на принтере, позволяют не только изучить анатомические особенности конкретного пациента или провести симуляцию хирургического вмешательства, но и подобрать форму и/или выбрать хирургические инструменты или имплантаты. Такая практика имеет свои преимущества — хирург получает возможность скорректировать форму инструментов или модифицировать их в контролируемых условиях вне операционной, а это, в свою очередь, оптимизирует процесс операции, снижает ее длительность, повышая точность работы инструментом или точность установки имплантата [7].

Нейрохирурги используют модели аневризмы для подгонки формы микрокатетера под кривизну сосуда конкретного пациента. Было установлено, что предварительно обработанные микрокатетеры соответствуют анатомии сосуда и аневризмы во время операции [32].

Модель аневризмы аорты используется сосудистыми хирургами для подбора соответствующего устройства для коррекции аневризмы [33].

Опубликованы исследования о применении в ортопедической хирургии предварительно сформованных по анатомической модели титановых пластин: модель пяточной кости используется при планировании остеосинтеза перелома пяточной кости, модель ключицы — при лечении перелома ключицы [2, 34].

Использование анатомических моделей нашло широкое применение в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии. Имеются сведения об изготовлении моделей свода черепа и лицевых костей для отработки формы титановых имплантатов, об изготовлении модели черепа и глазниц для формирования синтетического ложа при коррекции посттравматической деформации глазницы, о печати нижней челюсти с дефектом для изготовления хирургического шаблона, об изготовлении модели таза для разработки шаблона для последующего забора аутооттрансплантата. Анатомическая модель применяется не только для коррекции формы имплантата, но и для разработки его структуры и расчетов распределения напряжений, сообщаемых имплантату [35].

Исследования о применении моделей в челюстно-лицевой хирургии свидетельствуют об отработке формы титановых пластин для глазницы, нижней челюсти

и свода черепа. Отрабатывается не только форма титановых пластин, но также длина и специфика винтов для интраоперационного применения во время операций по коррекции контура у пациентов с тяжелой фиброзной дисплазией. Анатомические модели применяются для отработки формы шаблона для лобной пазухи при проведении операций по формированию пересаживаемого лоскута [36]. Еще один пример успешного применения САПР и трехмерной печати — разработка индивидуальных моделей верхней челюсти, используемых при прогнозировании этапов формирования кости у детей с врожденной расщелиной губы и нёба. Соответствующая прогнозу модель была напечатана и использовалась для предоперационного формирования назоальвеолярной области при коррекции расщелины [37].

Напечатанные анатомические модели — важный образовательный инструмент, как для студентов, так и для врачей-интернов. Иногда у студентов отсутствует доступ к трупному материалу, и в этом случае анатомическая модель может оказаться полезной. Модели также можно использовать для наглядной демонстрации патологий, отсутствующих в доступном трупном материале. К таким патологиям относятся, например, различные дефекты межжелудочковой перегородки [38]. Хорошо зарекомендовали себя трехмерные модели в обучении хирургов-интернов. Технология применяется достаточно широко и позволяет выполнять тренировочные операции с демонстрацией анатомической патологии, обеспечивая тактильную обратную связь, близкую к реальной при выполнении операции.

В учебных целях трехмерные модели широко применяются в нейрохирургии. Среди опубликованных примеров: симуляция операций на основании черепа с использованием модели височной кости, операций по клипированию аневризмы головного мозга с использованием моделей конкретных пациентов, ретракция мозга с использованием модели мозга, точно воссоздающей консистенцию тканей, симуляция эндоскопических операций на модели пациента с гидроцефалией, симуляция ультразвуковой хирургии, симуляция постановки наружного вентрикулярного дренирования. В нейрохирургии была разработана технология обеспечения тактильной обратной связи — была создана модель мозга, обеспечивающая такую обратную связь, и преобразователи усилия, что помогает нейрохирургам научиться атравматично выполнять ретракцию мозговой ткани [39].

Трехмерная печать стала темой исследований и в общей хирургии: например, эта технология применялась для изготовления компонентов для симуляции

лапароскопических операций по пилоропластике, эндоскопической операции по ампулэктомии.

Использование моделей височной кости для симуляции операций и предоперационного планирования применяется в обучении интернов-хирургов, специализирующихся в оториноларингологии, причем от специалистов поступил запрос на разработку дешевой модели, обеспечивающей адекватную тактильную обратную связь при просверливании. Такая модель баллы разработана; она может быть напечатана на настольном 3D-принтере, и себестоимость модели составит 1,92 доллара за единицу. Для отработки других манипуляций по препарированию разработана и прошла валидацию еще одна модель височной кости [40]. Разработана также модель височной кости, воспроизводящая анатомию ребенка; ее преимущество заключается в том, что такой анатомический материал, получаемый от трупа ребенка, является весьма дорогостоящим и встречается редко. Опубликованы также результаты применения трехмерных моделей в обучении интернов-оториноларингологов (модели носовой полости, параназального синуса, патологий гипофиза для отработки хирургических навыков, патологий основания черепа для отработки навыков эндоскопической хирургии), а также разработки системы симуляции для отработки мастоидэктомии [41].

В челюстно-лицевой хирургии и стоматологии применяются модели, обеспечивающие реалистичную обратную связь: выше упоминалась выполненная из соли модель нижней челюсти [10].

В пластической хирургии для обучения хейлопластике используются модели, воспроизводящие расщелину губы и нёба: модели изготавливаются из силикона, стоят менее 50 долларов и пользуются популярностью у обучающихся. Хирурги-офтальмологи используют модели глазниц для обучения и отработки хирургических навыков.

Технология быстрого прототипирования позволяет в цифровом виде осуществить подгонку имплантатов, протезов, шин и внешних фиксаторов под конкретного пациента. Отработанные на компьютере симуляции хирургического вмешательства позволяют спрогнозировать оптимальный результат, разработать и напечатать соответствующий инструментарий. Трехмерная печать впервые позволила сделать эти инструменты максимально соответствующими конкретному пациенту [7].

Среди исследований в области нейрохирургии отмечен пример печати индивидуального позвонка из титана для реконструкции верхней части шейного отдела позвоночника у подростка с саркомой Юинга. Для коррекции дефектов черепа



используются напечатанные на трехмерном принтере имплантаты из полиметаметилакрилата. Отмечено, что применение напечатанного имплантата характеризуется низким количеством осложнений и высокой степенью удовлетворенности пациента и его родственников. В кардиоторакальной хирургии используются протезы ребра, напечатанные на трехмерном принтере и используемые для реконструкции стенки грудной клетки после крупной операции по резекции немелкоклеточного рака легких [42].

Широкое применение нашла технология и в хирургической ортопедии. Например, сложная анатомия области таза не допускает непосредственной реконструкции, но трехмерная печать позволяет провести её. Для коррекции комплексного дефекта после резекции хондросаркомы таза был изготовлен индивидуальный титановый имплантат с ацетабулярной чашкой. Всего индивидуальные, напечатанные на трехмерном принтере вертлужные компоненты были имплантированы 24 пациентам. Авторы исследования посчитали данный подход эффективным и готовым к применению на большей группе пациентов. Применяются также напечатанные на трехмерном принтере пластины для фиксации при лечении межмышечковых переломов плеча. Изготавливается и индивидуальное оборудование для фиксации. На компьютере было спроектировано оборудование (в том числе были подобраны места для отверстий) для фиксации при переломах большеберцовой кости [43]. Авторы назвали эту систему «Q-фиксатор»; она легка в установке, обеспечивает качественную репозицию кости и ее фиксацию вне зависимости от опыта хирурга.

В урологии применяется печать уретральных стентов из резиноподобного материала для долгосрочной терапии пузырно-мочеточникового рефлюкса. Эти стенты еще предстоит испытать на животных, однако стоит упомянуть о самой возможности применения САПР и трехмерной печати в разработке, прототипировании и исследовании стентов *in vitro* [22].

В оториноларингологии изготавливаются индивидуальные шины для лечения трахеобронхомаляции у младенцев [16].

Стоматологи и челюстно-лицевые хирурги используют напечатанную титановую сетку для коррекции дефектов верхней челюсти, спроектированные на компьютере и напечатанные на 3D-принтере дуги из сплава хрома и кобальта, применяемые для лечения переломов нижней и/или верхней челюсти, а также индивидуальные вставки, пропитанные антибиотиками, используемые при резекции и последующей коррекции височно-нижнечелюстного сустава [44].

В челюстно-лицевой хирургии имплантаты ушной раковины успешно применяются при реконструкции врожденного отсутствия уха или его потери. В двух исследованиях была проведена оценка роли САПР и трехмерной печати в проектировании и изготовлении таких имплантатов. Сообщается, что применение трехмерной печати для данной цели является допустимым. Протезы ушной раковины изготавливались в САПР и печатались на трехмерном принтере. Было установлено, что данные технологии позволяют уменьшить затраты времени на изготовление протезов. В настоящем исследовании не рассматриваются вопросы тканевой инженерии, однако следует отметить, что в настоящее время ведется работа по печати клеточных биокаркасов для выращивания ушной раковины, насыщенных веществами, усиливающими рост. Трехмерная печать используется также для изготовления титановых имплантатов для реконструкции черепа при обширных повреждениях. Более того, для предоперационной оценки постановки имплантата печатается также и модель черепа пациента [32].

Офтальмологи сообщают о печати индивидуальных глазных протезов и интраокулярных линз для имплантации после удаления катаракты. Следует отметить, что напечатанная линза не соответствует текущим клиническим стандартам, но является перспективной разработкой [45].

Трехмерная печать хирургического инструмента и направляющих обладает большим потенциалом. Эта технология позволяет использовать индивидуально созданные инструменты и точные направляющие, и даже разрабатывать новое хирургическое оборудование в условиях, когда получить требуемые инструменты или оборудование стандартными способами не представляется возможным [7].

В нейрохирургии применяются и доказали точность, эффективность и легкость в использовании напечатанные трехмерные направляющие шаблоны для фронтоорбитальной репозиции [39].

В исследованиях, посвященных общей хирургии, сообщается об изготовлении стандартных хирургических инструментов, однако быстрое протитипирование применяется и для изготовления уникальных или сложных инструментов. Группа исследователей применила САПР и трехмерную печать при изготовлении новых эндоскопических устройств. Печать применялась не только для изготовления устройства, но и для их улучшения (отметим, что устройства применялись только на животных) [4].

В ортопедической хирургии изготавливаются индивидуальные шаблоны-направляющие для точной резекции остеосаркомы, корригирующей остеотомии при

лечении деформации в пронации, однополюсной артропластике колена, а также для задания направления при установке винта в ножку позвонка в шейном отделе, для направления винта при фиксации переломов плато большеберцовой кости [46], фиксации винта в ножке позвонка в поясничном отделе. Применение напечатанных на принтере направляющих в ортопедии позволило сократить время операций и уменьшить кровопотери во время операций [16].

Группа исследователей в области урологии изготовила на принтере не только стенты, но и троакары для лапароскопической хирургии.

Следует подробнее остановиться на новом способе использования САПР и трехмерной печати в урологии. Корреляция между МРТ и гистологией рака предстательной железы очень важна в повышении прогностической точности МРТ во время болезни. В 2014 году есть сообщения о применении САПР и трехмерной печати для создания формы на основании данных МРТ, которая могла бы быть размещена вокруг удаляемой опухоли. На форму находятся параллельные щели, соответствующие по расположению срезам МРТ. После резекции опухоль рассекается на соответствующие секции, после чего гистологические срезы сравниваются со срезами МРТ для выявления корреляции [22].

Большинство публикаций на тему трехмерной печати инструментов и направляющих относятся к стоматологии и челюстно-лицевой хирургии. Возможная причина этому заключается в том, что применение направляющих в хирургической ортодонтии не является редкостью. Технология быстрого прототипирования применяется для изготовления инструментов для репозиции и шин для фиксации верхней и нижней челюсти, а также межокклюзионных пластинок, которые также изготавливаются при помощи САПР. Эти примеры показывают, что разработка индивидуальных устройств повышает точность хирургической ортодонтии. Применяются также шаблоны и направляющие: в опубликованных исследованиях приводятся сведения о печати шаблонов при лечении остеохондромы нижнечелюстного мышцелка, при восстановлении нижней челюсти свободным лоскутом, при пластике подбородка; применяются шаблоны при репозиции верхней челюсти и других видах челюстной хирургии, используются хирургические шаблоны при лечении переломов нижней челюсти и мышцелка. Сообщается также о применении напечатанных на принтере направляющих для сверления [47].

В челюстно-лицевой хирургии используется печать модели дефекта дна глазницы. Модель используется для моделирования пластики аутогенным костным трансплантатом. Кроме того, печатаются индивидуальные направляющие для остеотомии нижней челюсти при лечении гемифациальной микросомии, при вытяжении нижней челюсти во время коррекции гипоплазии нижней челюсти, при трехмерном оконтуривании тканей при лечении тяжелой фиброзной дисплазии [48].

Трехмерная печать применяется и в пластической хирургии: при хирургии кисти применяются зажимы для репозиции кости, направляющие для иссечения кости при коррекции нижнечелюстного угла. Напечатанные на трехмерном принтере направляющие используются в офтальмологии; они зарекомендовали себя в проведении технически сложных операций, таких, как коррекция донорской радужной оболочки при проведении автоматической эндотелиальной кератопластики с расслоением десцеметовой мембраны. Наконец, группа исследователей в области акушерства и гинекологии опубликовала отчет об экспериментальной проверке концепции возможной трехмерной печати хирургического оборудования: была изготовлена соединительная насадка для аспирационной трубки, позже она была применена во время операции [49].

Настоящее исследование представляет обзор самых разных областей применения 3D-моделирования и трехмерной печати в медицине, причем количество их растет. Авторы представили обзор развития технологии быстрого прототипирования и некоторые соображения относительно начала работы в этой сфере: получение визуализации, программное обеспечение, материалы для печати, их стерилизация, финансовые и временные затраты. Как видно из растущего в последние 10 лет числа публикаций по данной теме, применение трехмерной печати в хирургии становится все более частой практикой. Авторы полагают, что это является следствием впечатляющих возможностей и большого потенциала для применения трехмерной печати, а также удешевления этой технологии. Внедрение её в клинической практике может показаться сложной проблемой, вовлекающей в обязательную работу с незнакомым программным обеспечением и огромное количество способов печати. Работа междисциплинарной группы специалистов, быстрое технологическое развитие в данной области, однако, могут сделать применение трехмерной печати в решении соответствующих задач крайне полезным.

**Список литературы**

1. Alberti C. Three-dimensional CT and structure models / C. Alberti // *The British Journal of Radiology*. – 1980. – Vol. 53. – № 627. – P. 261-262.
2. Frame M. Rapid Prototyping in Orthopaedic Surgery: A User's Guide / M. Frame, J.S. Huntley // *The Scientific World Journal*. – 2012. – Vol. 2012. – P. 1-7.
3. Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology / G.B. Kim [et al.] // *Korean Journal of Radiology*. – 2016. – Vol. 17. – № 2. – P. 182.
4. From 3-Dimensional Printing to 5-Dimensional Printing: Enhancing Thoracic Surgical Planning and Resection of Complex Tumors / E.A. Gillaspie [et al.] // *The Annals of Thoracic Surgery*. – 2016. – Vol. 101. – № 5. – P. 1958-1962.
5. Generation of three-dimensional prototype models based on cone beam computed tomography / J.T. Lambrecht [et al.] // *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. – 2009. – Vol. 4. – № 2. – P. 175-180.
6. A systematic review of image segmentation methodology, used in the additive manufacture of patient-specific 3D printed models of the cardiovascular system / N. Byrne [et al.] // *JRSM Cardiovascular Disease*. – 2016. – Vol. 5. – P. 204800401664546.
7. Application of 3-Dimensional Printing in Hand Surgery for Production of a Novel Bone Reduction Clamp / S.M. Fuller [et al.] // *The Journal of Hand Surgery*. – 2014. – Vol. 39. – № 9. – P. 1840-1845.
8. Three-dimensional printing to facilitate anatomic study, device development, simulation, and planning in thoracic surgery / S.N. Kurenov [et al.] // *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. – 2015. – Vol. 149. – № 4. – P. 973-979.e1.
9. 3D printed reproductions of orbital dissections: a novel mode of visualising anatomy for trainees in ophthalmology or optometry / J.W. Adams [et al.] // *British Journal of Ophthalmology*. – 2015. – Vol. 99. – № 9. – P. 1162-1167.
10. Salt as a New Colored Solid Model for Simulation Surgery / T. Okumoto [et al.] // *Journal of Craniofacial Surgery*. – 2015. – Vol. 26. – № 3. – P. 680-681.
11. Yu A.W. On-demand three-dimensional printing of surgical supplies in conflict zones / A.W. Yu, M. Khan // *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*. – 2015. – Vol. 78. – № 1. – P. 201-203.
12. Regulatory Considerations in the Design and Manufacturing of Implantable 3D-Printed Medical Devices / R.J. Morrison [et al.] // *Clinical and Translational Science*. – 2015. – Vol. 8. – № 5. – P. 594-600.

13. Mahmoud A. Introducing 3-Dimensional Printing of a Human Anatomic Pathology Specimen: Potential Benefits for Undergraduate and Postgraduate Education and Anatomic Pathology Practice / A. Mahmoud, M. Bennett // *Archives of Pathology & Laboratory Medicine*. – 2015. – Vol. 139. – № 8. – P. 1048-1051.
14. Three-dimensional printing surgical instruments: are we there yet? / T.M. Rankin [et al.] // *Journal of Surgical Research*. – 2014. – Vol. 189. – № 2. – P. 193-197.
15. Clinical application of three-dimensional printing in the personalized treatment of complex spinal disorders / Y.-T. Wang [et al.] // *Chinese Journal of Traumatology*. – 2016. – Vol. 19. – № 1. – P. 31-34.
16. 3D Printout Models vs. 3D-Rendered Images: Which Is Better for Preoperative Planning? / Y. Zheng [et al.] // *Journal of Surgical Education*. – 2016. – Vol. 73. – № 3. – P. 518-523.
17. The utility of a multimaterial 3D printed model for surgical planning of complex deformity of the skull base and craniovertebral junction / D. Pacione [et al.] // *Journal of Neurosurgery*. – 2016. – Vol. 125. – № 5. – P. 1194-1197.
18. Application of 3D Rapid Prototyping Technology in Posterior Corrective Surgery for Lenke 1 Adolescent Idiopathic Scoliosis Patients / M. Yang [et al.] // *Medicine*. – 2015. – Vol. 94. – № 8. – P. e582.
19. Patient specific biomodel of the whole aorta - the importance of calcified plaque removal / Håkansson [et al.] // *Vasa*. – 2011. – Vol. 40. – № 6. – P. 453-459.
20. Use of a Three Dimensional Printed Cardiac Model to Assess Suitability for Biventricular Repair / K.M. Farooqi [et al.] // *World Journal for Pediatric and Congenital Heart Surgery*. – 2016. – Vol. 7. – № 3. – P. 414-416.
21. Three-Dimensional Printing Creates Models for Surgical Planning of Aortic Valve Replacement After Previous Coronary Bypass Grafting / R. Sodian [et al.] // *The Annals of Thoracic Surgery*. – 2008. – Vol. 85. – № 6. – P. 2105-2108.
22. Surgical results of cranioplasty with a polymethylmethacrylate customized cranial implant in pediatric patients: a single-center experience / P. Fiaschi [et al.] // *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*. – 2016. – Vol. 17. – № 6. – P. 705-710.
23. Three-dimensional print of a liver for preoperative planning in living donor liver transplantation / N.N. Zein [et al.] // *Liver Transplantation*. – 2013. – Vol. 19. – № 12. – P. 1304-1310.
24. 3-D printout of a DICOM file to aid surgical planning in a 6 year old patient with a large scapular osteochondroma complicating congenital diaphyseal aklasia / M.D. Tam [et al.] //

Journal of Radiology Case Reports. – 2012. – Vol. 6. – № 1.

25. Personalized 3D printed model of kidney and tumor anatomy: a useful tool for patient education / J.-C. Bernhard [et al.] // World Journal of Urology. – 2016. – Vol. 34. – № 3. – P. 337-345.
26. Mendez B.M. Customized “In-Office” Three-Dimensional Printing for Virtual Surgical Planning in Craniofacial Surgery / B.M. Mendez, M. V. Chiodo, P.A. Patel // Journal of Craniofacial Surgery. – 2015. – Vol. 26. – № 5. – P. 1584-1586.
27. A Novel Preoperative Planning Technique Using a Combination of CT Angiography and Three-Dimensional Printing for Complex Toe-to-Hand Reconstruction / H. Tan [et al.] // Journal of Reconstructive Microsurgery. – 2015. – Vol. 31. – № 5. – P. 369-377.
28. 3D printing to simulate laparoscopic choledochal surgery / O.C. Burdall [et al.] // Journal of Pediatric Surgery. – 2016. – Vol. 51. – № 5. – P. 828-831.
29. 3D printed models for planning endovascular stenting in transverse aortic arch hypoplasia / I. Valverde [et al.] // Catheterization and Cardiovascular Interventions. – 2015. – Vol. 85. – № 6. – P. 1006-1012.
30. Airway Stent Insertion Simulated With a Three-Dimensional Printed Airway Model / T. Miyazaki [et al.] // The Annals of Thoracic Surgery. – 2015. – Vol. 99. – № 1. – P. e21-e23.
31. Preliminary Evaluation of a Novel Thoracoscopic Infant Lobectomy Simulator / K.A. Barsness [et al.] // Journal of Laparoendoscopic & Advanced Surgical Techniques. – 2015. – Vol. 25. – № 5. – P. 429-434.
32. Three-dimensional liver model based on preoperative CT images as a tool to assist in surgical planning for hepatoblastoma in a child / R. Souzaki [et al.] // Pediatric Surgery International. – 2015. – Vol. 31. – № 6. – P. 593-596.
33. Initial Experience With a Tailor-made Simulation and Navigation Program Using a 3-D Printer Model of Kidney Transplantation Surgery / M. Kusaka [et al.] // Transplantation Proceedings. – 2015. – Vol. 47. – № 3. – P. 596-599.
34. Surgical tips of intramedullary nailing in severely bowed femurs in atypical femur fractures: Simulation with 3D printed model / J.H. Park [et al.] // Injury. – 2016. – Vol. 47. – № 6. – P. 1318-1324.
35. Mechanical Modeling of the Human Cricoid Cartilage Using Computer-Aided Design / C.M. Johnson [et al.] // Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology. – 2016. – Vol. 125. – № 1. – P. 69-76.
36. Microcatheter Shaping for Intracranial Aneurysm Coiling Using the 3-Dimensional

Printing Rapid Prototyping Technology: Preliminary Result in the First 10 Consecutive Cases / K. Namba [et al.] // *World Neurosurgery*. – 2015. – Vol. 84. – № 1. – P. 178-186.

37. Kim H.N. Use of a real-size 3D-printed model as a preoperative and intraoperative tool for minimally invasive plating of comminuted midshaft clavicle fractures / H.N. Kim, X.N. Liu, K.C. Noh // *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. – 2015. – Vol. 10. – № 1. – P. 91.

38. Reverse engineering of mandible and prosthetic framework: Effect of titanium implants in conjunction with titanium milled full arch bridge prostheses on the biomechanics of the mandible / R. De Santis [et al.] // *Journal of Biomechanics*. – 2014. – Vol. 47. – № 16. – P. 3825-3829.

39. Frontal sinus models and onlay templates in osteoplastic flap surgery / M. Daniel [et al.] // *The Journal of Laryngology & Otology*. – 2011. – Vol. 125. – № 1. – P. 82-85.

40. Presurgical Nasoalveolar Molding for Cleft Lip and Palate / C. Shen [et al.] // *Plastic and Reconstructive Surgery*. – 2015. – Vol. 135. – № 6. – P. 1007e-1015e.

41. Utilizing Three-Dimensional Printing Technology to Assess the Feasibility of High-Fidelity Synthetic Ventricular Septal Defect Models for Simulation in Medical Education / J.P. Costello [et al.] // *World Journal for Pediatric and Congenital Heart Surgery*. – 2014. – Vol. 5. – № 3. – P. 421-426.

42. Cruz M.J. Da. Face and content validation of a novel three-dimensional printed temporal bone for surgical skills development / M.J. Da Cruz, H.W. Francis // *The Journal of Laryngology & Otology*. – 2015. – Vol. 129. – № S3. – P. S23-S29.

43. ElePhant - An anatomical Electronic Phantom as simulation-system for otologic surgery / R. Grunert [et al.] // *2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. – IEEE, 2006. – P. 4408-4411.

44. Customised 3D Printing: An Innovative Training Tool for the Next Generation of Orbital Surgeons / R.L. Scawn [et al.] // *Orbit*. – 2015. – Vol. 34. – № 4. – P. 216-219.

45. Three-dimensional printing titanium ribs for complex reconstruction after extensive posterolateral chest wall resection in lung cancer / L. Wang [et al.] // *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. – 2016. – Vol. 152. – № 1. – P. e5-e7.

46. Application of 3D printed customized external fixator in fracture reduction / F. Qiao [et al.] // *Injury*. – 2015. – Vol. 46. – № 6. – P. 1150-1155.

47. Custom Anatomical 3D Spacer for Temporomandibular Joint Resection and Reconstruction / J. Green [et al.] // *Craniofacial Trauma and Reconstruction*. – 2015. – Vol. 9. – № 1. – P. 082-087.



48. Computer-aided design and three-dimensional printing in the manufacturing of an ocular prosthesis / S. Ruiters [et al.] // *British Journal of Ophthalmology*. – 2016. – Vol. 100. – № 7. – P. 879-881.
49. Improved accuracy of 3D-printed navigational template during complicated tibial plateau fracture surgery / H. Huang [et al.] // *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*. – 2015. – Vol. 38. – № 1. – P. 109-117.