

ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ В ХИРУРГИИ ПОЗВОНОЧНИКА И ДРУГОЙ КОСТНОЙ ПАТОЛОГИИ

Баиндурашвили А.Г., Виссарионов С.В., Познович М.С., Овечкина А.В., Залетина А.В.

ФГБУ «Научно-исследовательский детский ортопедический институт им. Г.И. Турнера» Минздрава России, Санкт-Петербург, e-mail: Poznovich@bk.ru

В статье представлен анализ данных отечественной и зарубежной литературы по вопросам применения трехмерных технологий моделирования, прототипирования и трехмерной печати при патологических состояниях в травматологии и ортопедии, в том числе у детей. Просмотрены более 2000 научных публикаций, из них для анализа информации по поставленным вопросам были выбраны 39 (1,95%), из которых 4 публикации – отечественные, остальные – зарубежные. По результатам анализа приведены сведения об особенностях различных технологий изготовления модели, применяемых материалов и необходимости взаимодействия медицинских и инженерных специалистов. Одним из направлений медицины, где трехмерная печать (3ДП) имеет большой потенциал, является ортопедия, и в частности хирургия позвоночника, из-за сложной анатомии, а также деликатного характера окружающих структур. Преимуществом 3D-печатных моделей позвоночника является реалистичное хирургическое моделирование в предоперационном планировании, что оказывает неоценимый вклад при подготовке к хирургическому лечению патологии позвоночника. Применение трехмерных технологий способствует сокращению времени оперативного вмешательства, интраоперационной кровопотери, повышению точности выполняемых хирургических манипуляций и введения металлических конструкций в костную ткань, особенно при использовании транспедикулярных винтов, применяемых при различных врожденных и приобретенных (посттравматических) деформациях позвоночника, в том числе у детей.

Ключевые слова: хирургия позвоночника, импланты, трехмерная печать, 3D-моделирование.

THE USE OF THREE-DIMENSIONAL PRINTING IN SPINAL SURGERY AND OTHER BONE PATHOLOGY

Baindurashvili A.G., Vissarionov S.V., Poznovich M.S., Ovechkina A.V., Zaletina A.V.

The Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics, St. Petersburg, e-mail: Poznovich@bk.ru

The article presents an analysis of native and foreign literature data on the use of three-dimensional modeling technologies, prototyping and three-dimensional printing in pathological conditions in traumatology and orthopedics, including children. More than 2,000 scientific publications were reviewed, of which 39 (1.95%) were selected to analyze information on the issues raised, of which 4 were russian and the rest foreign. The abstract provides information about the features of various techniques of making the models, materials used and the need for interaction between medical and engineering specialists. One of the areas of medicine where 3DP has great potential is orthopedics, and in particular spinal surgery due to complex anatomy and delicate nature of if the surrounded structures. The advantage of 3D-printed models of spine is realistic surgical modeling in preoperative planning, which provides an invaluable contribution to the preparation for surgical treatment of spinal pathology. The use of three-dimensional technologies reduces the time of surgery, intraoperative hematopoiesis, improving the accuracy of surgical manipulations and placement of metal structures in bone tissue, especially when using pedicle screws which are used in various congenital and acquired (post-traumatic) spinal deformities, including children.

Keywords: spine surgery, implants, three-dimensional printing, 3D-modeling.

Компьютерные трехмерные технологии и изготовление трехмерных печатных моделей различных органов человека для наиболее точного планирования и осуществления оперативного вмешательства находят все более широкое применение в хирургическом лечении различных патологий. Трехмерное моделирование – это быстро развивающееся направление, способное совершить революцию в медицине путем создания индивидуальных изделий из широкого спектра материалов [1-3]. Несмотря на то что многодетекторные КТ- и МРТ-исследования существенно улучшили радиологическую диагностику, обеспечив 3D-

визуализацию, мультипланарную реформацию и навигацию изображений, они ограничены использованием плоских экранов для визуализации 3D-данных.

Идея применения трехмерных медицинских изображений, а именно данных компьютерной томографии, для воссоздания физической модели впервые была предложена в 1979 году. Стереолитография (SteriolithographyApparatus – SLA) - технология, в которой управляемый компьютером луч лазера применяется для отверждения жидкого полимера или смолы, послойно создавая требуемую структуру, запатентована Чарльзом Халком в 1980-х годах. Эта методика стала первой доступной технологией 3D-печати и была применена в биомедицине в 1994 году. Ортопедическая хирургия, стоматология и челюстно-лицевая хирургия были 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. Практически любой орган человека может быть воспроизведен в виде трехмерной модели посредством трехмерной печати (3ДП). Печатаются как индивидуальные анатомические модели с отпечатком выявленных патологических изменений, так и индивидуальное медицинское оборудование: хирургические устройства, имплантаты, аппараты внешней фиксации, протезы, шины, шаблоны [4]. Однако еще достаточно сложно найти подборку публикаций, которые бы всесторонне освещали ряд интересующих вопросов, связанных с заболеваниями костно-мышечной системы. Публикации, касающиеся патологии позвоночника, в частности у детей, еще более редки.

Целью данной работы было изучение и оценка данных зарубежных и отечественных научных публикаций по применению трехмерной печати в хирургии позвоночника и другой костной патологии у детей.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели были просмотрены более 2000 научных публикаций, касающихся технических и медицинских вопросов применения прототипирования и трехмерной печати в медицине, в частности в травматологии и ортопедии, из них для анализа информации по поставленным вопросам были выбраны 39 (1,95%), из которых 4 публикации – отечественные, остальные - зарубежные.

Были изучены публикации, посвященные вопросам технологии изготовления прототипов для медицинских целей, применяемых для этого материалов, а также вопросам взаимодействия различных специалистов: врачей (хирургов) и инженерно-технических работников.

Особое внимание было уделено публикациям, посвященным оценке данных по применению прототипирования и трехмерной печати для медицинских целей. Среди них

было выделено в доступной нам литературе всего 8 публикаций (18%), в которых были приведены сведения об использовании трехмерных компьютерных технологий при патологии позвоночника.

Анализ публикаций по применению прототипирования и трехмерной печати в травматологии и ортопедии

Технология быстрого изготовления прототипов, основанная на системе автоматизированного проектирования, позволяет в сжатые сроки изготовить деталь, точно воспроизводящую инженерный чертеж с возможностью его корректировки и последующей модификации детали при необходимости [5].

На основании изучения данных научной литературы можно представить основные этапы изготовления трехмерной модели и увидеть, что процесс этот достаточно сложный и трудоемкий, но оправдан теми возможностями, которые он дает для окончательного решения поставленных задач.

Работа 3ДП неразрывно связана с программным обеспечением: 3D-принтеру необходима цифровая модель. Эту информацию получают при помощи различных методов трехмерной медицинской визуализации: компьютерная томография (КТ), КТ с коническим лучом, магнитно-резонансная томография (МРТ), рентгенография, системы лазерного сканирования, фотографии [5].

После обработки данных визуализации и создания цифровой модели следующим этапом 3ДП является создание физического продукта. Технология аддитивного производства основана на послойном создании требуемого изделия, «снизу-вверх», применяя селективное нанесение материала для построения модели. Также существует субтрактивное производство с применением фрезерования – удаление материала с заготовки (материалом которой, как правило, является полистирол). В субтрактивном производстве применяются менее дорогостоящие материалы. Аддитивное производство превосходит его с точки зрения геометрической точности и разнообразия сфер применения. При фрезеровании внутренняя структура модели всегда остается сплошной. Применяя аддитивную технологию, проектировщик контролирует внутреннюю структуру изделия. Это имеет большое значение при разработке хирургического инструмента. Изделие с сотовой внутренней структурой прочнее инструмента, изготовленного из сплошной заготовки. Контроль внутренней структуры модели позволяет проектировать изделие, изготовление которого потребует меньше материала и времени [5].

Таким образом, анализ первых приведенных публикаций показывает, что врач (хирург любой специализации), предоставив визуальные материалы интересующей его патологии

пациента, для изготовления трехмерной модели нуждается в помощи технического работника, обладающего специальными знаниями.

Применение в медицине быстрого прототипирования и 3ДП требует междисциплинарной работы группы специалистов. Большинство хирургов не знакомы с этими технологиями, а для работы даже с самими принтерами требуется инженерная подготовка в области системы автоматизированного прототипирования (САПР) [4]. Анализ показывает, насколько сложна данная технология и до какой степени необходимо участие в ней инженерно-технических специалистов.

D. Hoang (2016) с соавторами, проведя обзор существующих технологий 3ДП, применяемых в последние годы, выделили наиболее распространенные для изготовления трехмерной модели [4], но в то же время подходящие определенным материалам.

Технология послойного наложения расплавленной нити (свободной формовки или экструзии) подразумевает послойное наложение расплавленного термопластичного материала, в качестве которого используются акрилонитрил-бутадиен-стирол, воск, поликарбонат, полипропилен, полиэфиры [6]. В технологии селективного лазерного спекания (SLS) для спекания/сплавления мелкодисперсного термопластичного порошка (поликарбоната, нейлона) в слои при формировании модели применяется углекислый лазер, а в качестве материалов используются термопластики, керамика, металлы [7-9].

В технологии стереолитографии (SLA) используется ультрафиолетовый лазер и подвижная платформа, находящаяся в баке со смолой: лазер полимеризует смолу слой за слоем по мере того, как платформа погружается глубже в бак. В качестве материалов используется эпоксидная смола и акриловый фотополимер [10-12].

Технология многоструйного моделирования отличается тем, что при помощи сопл, подобных соплам струйного принтера, на керамический или металлический порошок распыляют жидкий связывающий компонент и получают тонкий слой твердого материала. Технология многоструйной печати сходна с многоструйным моделированием, однако допускается применение разнообразных материалов из числа фотополимеров, при этом обеспечивается более простая финишная обработка [13].

Как отмечают авторы ряда публикаций, в широком применении 3ДП-технологий существует ряд проблем, обусловленных не только затратами, но и нехваткой оборудования и специалистов, способных обеспечить широкое использование этой технологии на коммерческой основе. Ограничения в доступности обучения программному обеспечению, необходимому для работ по созданию цифровых и физических моделей, также являются существенным барьером [8; 11].

Выбор способа изготовления трехмерной модели методом 3ДП зависит от аппаратуры, финансовых возможностей для ее приобретения, а также сферы ее применения. На наш взгляд и предварительный опыт использования различных видов материалов, для печати наиболее приемлемо изготовление модели методом стереолитографии с применением материалов из числа фотополимеров.

Материалов, потенциально пригодных для использования, очень много. Помимо уже упомянутых, в трехмерной печати применяются и новые материалы. Интересным и нестандартным было предложение Т. Okumoto с соавторами при печати моделей челюстно-лицевых костей на трехмерном струйном принтере в качестве материала использовать соль. 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 [14]. Однако использование 3D-моделей челюстно-лицевых костей из традиционного полимера не ухудшило их качества и применено при выполнении операций по исправлению пороков развития нижней челюсти у детей с положительным эффектом [15].

Авторы, применившие 3ДП в своих исследованиях, отмечали следующие положительные и отрицательные моменты в применяемой технологии. Созданная цифровая трехмерная модель и физическое её воплощение дают полномасштабное, стереоскопическое понимание патологии, позволяют более детально планировать и моделировать предстоящую операцию, причем польза 3ДП повышается с усложнением патологии [6; 7; 13].

Создание визуальной и индивидуальной модели дает клинические преимущества, такие как сокращение времени операции, что приводит к уменьшению интраоперационной кровопотери [14]. Основные причины сокращения времени операции заключаются в более глубоком понимании патологии, её строения и расположения, заранее выбранной стратегии хирургического вмешательства, а также в облегчении принятия дооперационных инструментальных решений [16; 17]. Отмечены также и другие клинические преимущества: более точная постановка диагноза, уменьшение времени рентгеноскопии, более слаженная работа хирургической бригады [18].

Y.T. Wang с соавторами (2016) установили, что применение индивидуальных моделей, созданных при помощи 3ДП, позволяет детально провести предоперационное планирование хирургического вмешательства, уменьшить операционную травму, что способствует скорейшему ее заживлению, и тем самым ускорить послеоперационную реабилитацию, сделав процедуру более экономичной [17].

Тем не менее применение трехмерных технологий становится все более распространенным явлением в медицине. Одним из направлений, где 3ДП предлагает

большие потенциальные преимущества, является нейрохирургия, и в частности хирургия позвоночника, из-за сложной анатомии, а также деликатного характера окружающих структур [3].

Согласно изученным публикациям, широкой областью для применения трехмерных моделей является ортопедия, где часто приходится сталкиваться с редкой или аномальной анатомией. Так, 3ДП применялись при планировании резекции обширной лопаточной остеохондромы [18].

Подобное планирование операций по ревизионной дискэктомии в поясничном отделе позвоночника позволило сократить время операции и кровопотерю во время нее [19].

Напечатанные трехмерные анатомические модели позволяют хирургу не только точнее оценить патологическую анатомию пациента, но и провести симуляцию хирургического вмешательства, отработав манипуляции с учетом индивидуальных особенностей. Это особенно важно при планировании операций для пациентов со сложными деформациями опорно-двигательного аппарата [20].

Важнейшее преимущество применения 3ДП в хирургии позвоночника – это способность производить имплантаты индивидуально для каждого пациента (PSI). В литературе отмечено, что пациенты со сложной анатомией и деформацией врожденного или приобретенного характера, подвергаемые комплексу операций, могут иметь повышенный риск непригодности шаблонного имплантата, когда реконструктивный вариант не вписывается точно в реконструктивный дефект. Однако, несмотря на это, PSI кажутся более долговечными благодаря более равномерному распределению нагрузки на костную ткань и превосходной остеоинтеграции [21].

Индивидуальный подход с использованием 3ДП очень перспективен и оправдан при использовании транспедикулярных винтов при коррекции деформации или последствиях травмы позвоночника. Традиционные технологии (ручная установка на основе поверхностных анатомических ориентиров) связаны со многими проблемами фиксации винтов и несут в себе высокий риск развития интра- и послеоперационных осложнений. 3ДП позволяет точно определить направление транспедикулярного винта. Для создания направляющего шаблона необходимо выполнить КТ-сканирование опорных позвонков. Далее 3D-модель генерируется специализированным программным обеспечением, из которого можно определить оптимальную траекторию и размер винта. Разработанный навигационный шаблон с оптимальной траекторией винта, поверхность которого является обратной задней поверхности позвонка, обеспечивает хорошую посадку и точную установку винта [9].

При оценке безопасности установки транспедикулярных винтов (ТВ) в шейном отделе позвоночника авторами был проанализирован опыт установки 712 винтов при лечении 180

пациентов с травматическими и нетравматическими повреждениями шейного отдела позвоночника. При этом лишь в 6,7% случаев винты выходили за границы ножек, у двух пациентов была радикулопатия, связанная со сдавлением винтом корешков спинного мозга, в одном случае во время операции отмечено повреждение позвоночной артерии. Эти результаты позволили авторам сделать вывод о безопасности данной операции при различных поражениях шейного отдела позвоночника [22; 23].

Несмотря на положительные качества того или иного вида винтов в условиях конкретной ситуации, их применение ограничивается условиями установки, так как существует риск повреждения нервных корешков и кровеносных сосудов спинного мозга со всеми вытекающими последствиями. Решение данной проблемы стало возможным посредством применения технологии 3ДП. На основе той же дооперационной визуализации, что применялась при установке ТВ, стало возможным создание индивидуальных шаблонов направителей (ШН) для безопасной установки ТВ и тренировочных 3D-моделей позвонков, предназначенных для установки винтов [24; 25]. Успешность применения ШН оценивалась исследователями по степени смещения винта по шкале Grade со степенью 0 + I) от 91,3% до 100%. Мальпозиций винтов со степенью смещения Grade III не было выявлено. В работах без анализа мальпозиций ТВ по степени смещения корректное положение винтов составило 71,7–100% (среднее значение – 96%) [26].

В публикациях в основном авторы делятся своим опытом применения 3D-технологий прототипирования, но достаточно редко приводят статистические данные о результативности их применения.

Наглядное превосходство технологии 3ДП, которая, помимо 3D-визуализации, дополнена применением индивидуальных имплантатов, представлено в исследовании Н. Chen с соавторами (2015), которые оценивали клиническую эффективность использования 3ДП направляющей пластины при винтовой фиксации поясничных позвонков. 43 пациентам применили заднюю фиксацию транспедикулярным винтом в поясничном отделе позвоночника. В основной группе наблюдения была применена 3D-технология изготовления направляющей пластины для задней винтовой фиксации ножки поясничных позвонков, в контрольной группе - традиционная рентгеновская винтовая фиксация. После операции было проведено КТ-сканирование для оценки точности установки винта в соответствии со стандартом Рихтера. Все пациенты наблюдались в течение 1 месяца. Среднее время размещения каждого винта и количество кровоизлияний составило $4,9 \pm 2,1$ мин. и $8,0 \pm 11,1$ мл в основной группе и $6,5 \pm 2,2$ мин. и $59,9 \pm 13,0$ мл в контрольной группе соответственно, различия статистически значимы ($P < 0.05$). Ни в одной из групп не было отмечено явных

осложнений. По сравнению с традиционными методами лечения применение ЗДП позволяет сократить время операции и уменьшить кровопотерю [9].

Основная доля исследований, посвященных вопросам использования ШН в клинической практике, относится к категории пациентов старшего возраста, страдающих различной патологией позвоночника [27; 28].

В немногочисленных работах последних 5 лет по применению ШН у пациентов детского возраста приводятся данные по хирургическому лечению деформаций позвоночника при идиопатическом сколиозе, системных и врожденном сколиозах у детей старшего возраста [29-31].

Несомненное преимущество применения технологии ЗДП у детей с врожденными деформациями грудного и поясничного отделов позвоночника при помощи ШН представлено в исследовании Д.Н. Кокушина с соавторами (2018). По сведениям авторов количество корректно установленных ТВ при помощи ШН значительно превышает количество корректно установленных ТВ методом «свободной руки» (соответственно 96,3% к 78,8% при $p = 0,011$). Работа основана на ретроспективном анализе результатов лечения 10 пациентов (6 мальчиков, 4 девочки) с врожденным кифосколиозом на фоне нарушения формирования позвонков грудного и поясничного отделов позвоночника. Возраст пациентов варьировал от 2 лет 2 мес. до 6 лет 8 мес. (средний возраст – 3 года 8 мес.). На основании мультиспиральной компьютерной томографии позвоночника, выполненной в послеоперационном периоде, осуществляли оценку корректности положения установленных транспедикулярных винтов корригирующей многоопорной металлоконструкции у пациентов группы 1 (*in vivo*). Группа 2 (*in vitro*) сформирована из 27 моделей пластиковых позвонков с установленными в них ТВ при помощи ШН. Корректность положения установленных опорных элементов оценивали на основании шкалы S.D. Gertzbein с соавторами (1990). В группе 1 количество винтов составило 52. Корректность положения винтов по степени смещения имела следующее распределение: Grade 0 – 53,8%, Grade I – 25%, Grade II – 11,6%, Grade III – 9,6%. Количество винтов во 2 группе составило 54. Корректность положения: Grade 0 – 94,4%, Grade I – 1,9%, Grade II – 3,7%. Количество корректно установленных ТВ в пластиковые модели позвонков детей с врожденными деформациями грудного и поясничного отделов позвоночника при помощи ШН значительно выше количества корректно установленных винтов методом «свободной руки» (96,3% против 78,8%, $p = 0,011$). Полученные результаты применения ШН *in vitro* показали высокую точность и корректность установки ТВ, что дает перспективы использования данной методики в клинической практике у детей раннего возраста с врожденным сколиозом. Полученные результаты выглядят обнадеживающе и позволяют рассмотреть вопрос о проведении дальнейших

исследований, посвященных использованию ШН для установки ТВ при хирургическом лечении [26].

В настоящее время данные научной литературы по применению технологии 3ДП в детской хирургии позвоночника ограничены небольшим количеством клинических случаев. Как правило, в этих примерах описывается успешное применение индивидуальных, а не шаблонных имплантатов. Для изготовления индивидуальных 3D-печатных имплантатов используется тот же титановый порошок, что и для стандартных. Их отличие в том, что 3D-принтер способен придать порошку абсолютно любую форму. Вместо стандартных протезов, которые проще сделать на промышленном оборудовании, 3D-принтер создаёт чрезвычайно сложные геометрические конструкции, идеально замещающие костный дефект. Ещё одно преимущество 3D-печатных имплантатов заключается в их пористой структуре. В результате получается каркас для прорастания собственных остеообластов [32-34].

Случаи применения индивидуальных имплантатов в детской хирургии позвоночника являются анатомически сложными, редкими патологиями. Индивидуальное решение для восстановления анатомии является основой благоприятного исхода лечения.

В литературе описан случай успешной резекции саркомы Юинга – злокачественного новообразования, чаще всего встречающегося у подростков. N. Хи с соавторами (2016) описывают случай применения 3ДП технологии 12-летнему мальчику с саркомой Юинга второго шейного позвонка (С2), которому была проведена поэтапная корпорэктомия С2. Операция в шейном отделе позвоночника, первичного участка опухоли в данном случае, изначально имела высокую степень сложности. Резекция опухоли особенно сложна в атлантаксиальной области из-за анатомических особенностей, необходимости обширной резекции по онкологическим принципам и отсутствия специализированных имплантатов для реконструкции. В связи с повышенной сложностью операции была применена технология 3ДП для изготовления индивидуального имплантата. Для замещения дефекта между 1 и 3 шейными позвонками было создано индивидуальное искусственное тело позвонка, изготовленное по компьютерной модели с использованием порошка титанового сплава. Послеоперационная реабилитация прошла без осложнений. Через год наблюдений исследования КТ выявили признаки остеоинтеграции имплантата и отсутствие оседания или смещения конструкции. Данный пример применения персонализированного подхода в хирургии демонстрирует, как 3D-имплантаты могут стать индивидуальным решением редких случаев, в которых восстановление конкретной анатомии каждого пациента является ключевым и основополагающим фактором [32].

R.J. Mobbs с соавторами (2017) сообщили об операции с применением титанового Th9-имплантата тела позвонка после вертебротомии при первичной опухоли кости у 14-

летней девушки с прогрессирующим кифосколиозом и патологическим переломом позвонка Th9 с сагиттальной и коронарной деформацией вследствие деструктивной первичной опухоли. Хирургическая резекция и реконструкция выполнялись в сочетании с 3D-печатным, специфичным для пациента, имплантатом. Особенности нестандартной конструкции включали пористые титановые торцевые пластины, корректирующие ангуляцию имплантата для восстановления сагиттального баланса и отверстия для ножек в 3D-имплантате. Крепление конструкции передней колонны к конструкции винта задней ножки стало возможным благодаря индивидуальным особенностям имплантата. Авторы отметили преимущество 3ДП в возможности изготовления имплантатов для конкретного пациента, как в данном примере, благодаря которому удалось значительно сократить время работы. Предоперационное планирование максимизировало результаты хирургического лечения [33].

Реконструкция таза после резекции крестца является сложной задачей в хирургии позвоночника. Технологическое развитие 3ДП имплантатов позволило преодолеть эти трудности. D. Kim с соавторами (2017) представили случай хирургического лечения сакральной остеосаркомы у 16-летней девушки с использованием 3D-имплантата. Он состоял в основном из пористой сетки. После 3 месяцев неoadъювантной химиотерапии была проведена гемисакрэктомия с сохранением контралатеральных крестцовых нервов. Имплантат анатомически устанавливался на дефект и фиксировался системой винт-стержень до уровня L3. Из осложнений были отмечены левосторонняя невропатия седалищного нерва. Авторы утверждают, что данная операция была проведена впервые благодаря возможности создания 3D-печатных имплантатов. Освоенный метод может быть применен для реконструкции позвоночника после частичной или полной спондилэктомии при самых разных заболеваниях позвоночника [35].

При лечении патологии тазобедренного сустава и деформации проксимального отдела бедренной кости у детей отмечается, что визуализация при помощи одноплоскостной скиаграммы не в состоянии передать истинную пространственную конфигурацию бедренной кости. При совмещении одноплоскостной модели и трехмерной кости неизбежно возникают субъективные погрешности, вызывающие искажение заданных параметров, что может приводить к грубым ошибкам и, как следствие, к повторным операциям [36]. В дальнейшем они стали выполнять корригирующую остеотомию бедренной кости с использованием индивидуального шаблона, изготовленного методом 3ДП. Анализ результатов лечения 27 пациентов в возрасте 5-18 лет (32 тазобедренных сустава) с врожденной и приобретенной деформацией бедренной кости показал, что использование индивидуального 3D-моделирования позволяет добиться практически идеальной точности выполнения

корректирующей остеотомии, сократить время выполнения операции и уменьшить лучевую нагрузку на пациента [37].

Следует отметить, что для создания уникальных моделей возможно сочетание цифровых данных из разных источников. E.A. Gillaspie в 2016 году совместил данные компьютерной и позитронно-эмиссионной томографии для создания 3D-моделей. 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 [38]. Этот и предыдущие позитивные опыты указывают на широкие перспективы применения 3ДП в будущем.

Учеными прогнозируется, что в 3ДП могут быть включены более инновационные функции, такие как пористые матрицы, где плотность, диаметр пор и механические свойства могут отличаться в разных областях имплантата. Будущие направления, по мере того как технология 3ДП продолжает дешеветь, будут ускоряться и становиться точнее, ее использование в хирургии позвоночника, вероятно, станет стандартной и доступной процедурой. Более дешевые 3D-принтеры для повседневного использования вскоре могут стать реальностью, участвуя в создании имплантатов для персонализированной хирургической помощи. Ожидается также, что широкий спектр современных материалов откроет новые возможности, улучшив биосовместимость, остеоинтеграцию, биоразлагаемость. Перечисленные свойства будут являться лишь некоторыми из ожидаемых преимуществ [18; 39].

Однако самым большим шагом вперед станет биопринтинг, в котором клетки, факторы роста и биоматериал создадут живые ткани. Такой прорыв в медицине позволит осуществлять восстановление тканей и печать сложных органов [3].

Заключение

Анализ изученной научной литературы показал, что имеется достаточно широкий поток научной информации в вопросах применения технологий трехмерного моделирования, в том числе прототипирования, и трехмерной печати моделей в медицине. Представлены сведения о различных применяемых технологиях обработки модели и материалах, из которых они изготавливаются. Возможности для выбора технологий определяются степенью возможных финансовых затрат на сложную аппаратуру. Совершенно определенно необходимо содружество медицинских и инженерно-компьютерных специалистов, владеющих знаниями специальных программ и умением трудоемкого процесса изготовления моделей.

Применение 3D-технологий и 3D-печати в медицинской хирургической практике, в том числе травматологии и ортопедии, еще достаточно ограничено. Тем не менее немногочисленные публикации по данному вопросу свидетельствуют о многих положительных эффектах: сокращение времени оперативного вмешательства и, как следствие, сокращение интраоперационной кровопотери, повышение точности выполняемых хирургических манипуляций и введения металлических конструкций в костную ткань, особенно при использовании транспедикулярных винтов, применяемых при различных врожденных и приобретенных (посттравматических) деформациях позвоночника, в том числе у детей. Анализ научных публикаций показал перспективность развития и применения обсужденных технологий.

Исследование осуществлено в соответствии с государственным контрактом № К-27-НИР/111-1 на выполнение НИР в рамках программы Союзного государства на тему «Разработка новых спинальных систем с использованием технологий прототипирования в хирургическом лечении детей с тяжелыми врожденными деформациями и повреждениями позвоночника».

Список литературы

1. Martelli N., Serrano C., van den Brink H., Pineau J., Prognon P., Borget I., El Batti S. Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: A systematic review. *Surgery*. 2016. V. 159(6). P. 1485-1500. DOI:10.1016/j.surg.2015.12.017.
2. Tack P., Victor J., Gemmel P., Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *Biomed Eng Online*. 2016. V. 15(1). P. 115. DOI:10.1186/s12938-016-0236-4.
3. Provaggi E., Leong J.J.H., Kalaskar D.M. Applications of 3D printing in the management of severe spinal conditions. *Proc. Inst. Mech. Eng. H*. 2017. V. 231(6). P. 471-486. DOI: 10.1177/0954411916667761.
4. Hoang D., Perrault D., Stevanovic M., Ghiassi A. Surgical applications of three-dimensional printing: a review of the current literature & how to get started. *Ann. Transl. Med.* 2016. V. 4(23). P. 456. DOI:10.21037/atm.2016.12.18.
5. Adams J.W., Paxton L., Dawes K., Burlak K. 3D printed reproductions of orbital dissections: a novel mode of visualising anatomy for trainees in ophthalmology or optometry. *Br. J. Ophthalmol.* 2015. V. 99(9). P. 1162-1167. DOI: 10.1136/bjophthalmol-2014-306189.
6. Toyoda K., Urasaki E., Yamakawa Y. Novel approach for the efficient use of a full-scale, 3-dimensional model for cervical posterior fixation: a technical case report. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2013. V. 38(21). P. E1357-1360. DOI:10.1097/BRS.0b013e3182a1f1bd.

7. Yang J.C., Ma X.Y., Xia H., Wu Z.H., Ai F.Z., Zhang K., Yin Q.S. Clinical application of computer-aided design-rapid prototyping in C1-C2 operation techniques for complex atlantoaxial instability. *J. Spinal Disord. Tech.* 2014. V. 27(4). P. E143-150. DOI: 10.1097/01.bsd.0000450173.95940.ed.
8. Li C., Yang M., Xie Y., Chen Z., Wang C., Bai Y., Zhu X., Li M. Application of the polystyrene model made by 3-D printing rapid prototyping technology for operation planning in revision lumbar discectomy. *J. Orthop. Sci.* 2015. V. 20(3). P. 475-480. DOI: 10.1007/s00776-015-0706-8.
9. Chen H., Wu D., Yang H., Guo K. Clinical Use of 3D Printing Guide Plate in Posterior Lumbar Pedicle Screw Fixation. *Med. Sci. Monit.* 2015. V. 21. P. 3948-3954. DOI: 10.12659/msm.895597.
10. Kim M.P., Ta A.H., Ellsworth W.A., Marco R.A., Gaur P., Miller J.S. Three dimensional model for surgical planning in resection of thoracic tumors. *Int. J. Surg. Case Rep.* 2015. 16:127-129. DOI:10.1016/j.ijscr.2015.09.037.
11. Guo F, Dai J, Zhang J, Ma Y, Zhu G, Shen J, Niu G. Individualized 3D printing navigation template for pedicle screw fixation in upper cervical spine. *PLoS One.* 2017. V. 12(2). P. e0171509. DOI: 10.1371/journal.pone.0171509.
12. Chen H., Guo K., Yang H., Wu D., Yuan F. Thoracic Pedicle Screw Placement Guide Plate Produced by Three-Dimensional (3-D) Laser Printing. *Med. Sci. Monit.* 2016. V. 22. P. 1682-1686. DOI: 10.12659/msm.896148.
13. Sugawara T., Higashiyama N., Kaneyama S., Sumi M. Accurate and Simple Screw Insertion Procedure With Patient-Specific Screw Guide Templates for Posterior C1-C2 Fixation. *Spine (Phila Pa 1976).* 2017. V. 42(6). P. E340-E346. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001807.
14. Okumoto T., Sakamoto Y., Kondo S., Ogata H., Kishi K., Yoshimura Y. Salt as a new colored solid model for simulation surgery. *J. Craniofac. Surg.* 2015. V. 26(3). P. 680-681. DOI: 10.1097/SCS.0000000000001539.
15. Семенов М.Г., Михайлов В.В., Филиппова А.В., Стеценко А.Г. 3D-моделирование и прототипирование моделей челюстей как этап костно-реконструктивных операций на лицевом отделе черепа у детей // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2015. Т. 3. № 1. С. 38–45. DOI: 10.17816/PTORS3138-45.
16. Baskaran V., Strkalj G., Strkalj M., Di Ieva A. Current Applications and Future Perspectives of the Use of 3D Printing in Anatomical Training and Neurosurgery. *Front Neuroanat.* 2016. V. 10. P. 69. DOI:10.3389/fnana.2016.00069.

17. Wang Y.T., Yang X.J., Yan B., Zeng T.H., Qiu Y.Y., Chen S.J. Clinical application of three-dimensional printing in the personalized treatment of complex spinal disorders. *Chin. J. Traumatol.* 2016. V. 19(1). P. 31-34. DOI: 10.1016/j.cjtee.2015.09.009.
18. Wilcox B., Mobbs R.J., Wu A.M., Phan K. Systematic review of 3D printing in spinal surgery: the current state of play. *J. Spine Surg.* 2017. V. 3(3). P. 433-443. DOI: 10.21037/jss.2017.09.01.
19. Fiaschi P., Pavanello M., Imperato A., Dallolio V., Accogli A., Capra V., Consales A., Cama A., Piatelli G. Surgical results of cranioplasty with a polymethylmethacrylate customized cranial implant in pediatric patients: a single-center experience. *J. Neurosurg. Pediatr.* 2016. V. 17(6). P. 705-710. DOI: 10.3171/2015.10.PEDS15489.
20. Bernhard J.C., Isotani S., Matsugasumi T., Duddalwar V., Hung A.J., Suer E., Baco E., Satkunasivam R., Djaladat H., Metcalfe C., Hu B., Wong K., Park D., Nguyen M., Hwang D., Bazargani S.T., de Castro Abreu A.L., Aron M., Ukimura O., Gill I.S. Personalized 3D printed model of kidney and tumor anatomy: a useful tool for patient education. *World J. Urol.* 2016. V. 34(3). P. 337-345. DOI: 10.1007/s00345-015-1632-2.
21. Phan K., Sgro A., Maharaj M.M., D'Urso P., Mobbs R.J. Application of a 3D custom printed patient specific spinal implant for C1/2 arthrodesis. *J. Spine Surg.* 2016. V. 2(4). P. 314-318. DOI: 10.21037/jss.2016.12.06.
22. Hojo Y., Ito M., Suda K., Oda I., Yoshimoto H., Abumi K. A multicenter study on accuracy and complications of freehand placement of cervical pedicle screws under lateral fluoroscopy in different pathological conditions: CT-based evaluation of more than 1,000 screws. *Eur. Spine J.* 2014. V. 23(10). P. 2166-2174. DOI: 10.1007/s00586-014-3470-0.
23. Cho W., Le J.T., Shimer A.L., Werner B.C., Glaser J.A., Shen F.H. Anatomy of Lamina in the Subaxial Cervical Spine With the Special Reference to Translaminar Screws: CT and Cadaveric Analysis With Screw Trajectory Simulation. *Clin. Spine Surg.* 2017. V. 30(5). P. E535-E539. DOI: 10.1097/BSD.0000000000000159.
24. Bundoc R.C., Delgado G.G., Grozman S.A. A Novel Patient-Specific Drill Guide Template for Pedicle Screw Insertion into the Subaxial Cervical Spine Utilizing Stereolithographic Modelling: An In Vitro Study. *Asian Spine J.* 2017. V. 11(1). P. 4-14. DOI: 10.4184/asj.2017.11.1.4.
25. Chen H., Guo K., Yang H., Wu D., Yuan F. Thoracic Pedicle Screw Placement Guide Plate Produced by Three-Dimensional (3-D) Laser Printing. *Med Sci. Monit.* 2016. V. 22. P. 1682-1686. DOI: 10.12659/msm.896148.
26. Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Баиндурашвили А.Г., Овечкина А.В., Познович М.С. Сравнительный анализ положения транспедикулярных винтов у детей с врожденным сколиозом: метод «свободной руки» (in vivo) и шаблоны-направители (invitro) //

Травматология и ортопедия России. 2018. Т. 24. № 3. С. 53–63. DOI: 10.21823/2311-2905-2018-24-4-53-63.

27. Merc M., Drstvensek I., Vogrin M., Brajliah T., Recnik G. A multi-level rapid prototyping drill guide template reduces the perforation risk of pedicle screw placement in the lumbar and sacral spine. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2013. V. 133(7). P. 893-899. DOI: 10.1007/s00402-013-1755-0.

28. Azimifar F., Hassani K., Saveh A.H., Tabatabai Ghomshe F. A low invasiveness patient's specific template for spine surgery. *Proc. Inst. Mech. Eng. H.* 2017. V. 231(2). P. 143-148. DOI: 10.1177/0954411916682770.

29. Takemoto M., Fujibayashi S., Ota E., Otsuki B., Kimura H., Sakamoto T., Kawai T., Futami T., Sasaki K., Matsushita T., Nakamura T., Neo M., Matsuda S. Additive-manufactured patient-specific titanium templates for thoracic pedicle screw placement: novel design with reduced contact area. *Eur. Spine J.* 2016. V. 25(6). P. 1698-1705. DOI: 10.1007/s00586-015-3908-z.

30. Pan Y., Lu G.H., Kuang L., Wang B. Accuracy of thoracic pedicle screw placement in adolescent patients with severe spinal deformities: a retrospective study comparing drill guide template with free-hand technique. *Eur. Spine J.* 2018. V. 27(2). P. 319-326. DOI: 10.1007/s00586-017-5410-2.

31. Liu K., Zhang Q., Li X., Zhao C., Quan X., Zhao R., Chen Z., Li Y. Preliminary application of a multi-level 3D printing drill guide template for pedicle screw placement in severe and rigid scoliosis. *Eur Spine J.* 2017. V. 26(6). P. 1684-1689. DOI: 10.1007/s00586-016-4926-1.

32. Xu N., Wei F., Liu X. Reconstruction of the Upper Cervical Spine Using a Personalized 3D-Printed Vertebral Body in an Adolescent With Ewing Sarcoma. *Spine (Phila Pa 1976).* 2016. V. 41(1). P. E50-54. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001179.

33. Mobbs R.J., Coughlan M., Thompson R. The utility of 3D printing for surgical planning and patient-specific implant design for complex spinal pathologies: case report. *J. Neurosurg Spine.* 2017. V. 26(4). P. 513-518. DOI: 10.3171/2016.9.SPINE16371.

34. Choy W.J., Mobbs R.J., Wilcox B., Phan S. Reconstruction of Thoracic Spine Using a Personalized 3D-Printed Vertebral Body in Adolescent with T9 Primary Bone Tumor. *World Neurosurg.* 2017. V. 105. P. 1032.e13-1032.e17. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.05.133.

35. Kim D., Lim J.Y., Shim K.W., Han J.W., Yi S., Yoon D.H., Kim K.N., Ha Y., Ji G.Y., Shin D.A. Sacral Reconstruction with a 3D-Printed Implant after Hemisacrectomy in a Patient with Sacral Osteosarcoma: 1-Year Follow-Up Result. *Yonsei. Med. J.* 2017. V. 58(2). P. 453-457. DOI: 10.3349/ymj.2017.58.2.453.

36. Баиндурашвили А.Г., Басков В.Е., Филиппова А.В., Бортулев П.И., Барсуков Д.В., Поздникин И.Ю., Волошин С.Ю., Баскаева Т.В., Познович М.С. Планирование корригирующей остеотомии бедренной кости с использованием 3D-моделирования. Часть I //

Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2016. Т. 4. № 3. С. 52–58. DOI: 10.17816/PTORS4352-58.

37. Басков В.Е., Баиндурашвили А.Г., Филиппова А.В., Барсуков Д.В., Краснов А.И., Бортулев П.И., Поздникин И.Ю. Планирование корригирующей остеотомии бедренной кости с использованием 3D-моделирования. Часть II // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2017. Т. 5. № 3. С. 74–79. DOI: 10.17816/PTORS5374-79.

38. Gillaspie E.A., Matsumoto J.S., Morris N.E., Downey R.J., Shen K.R., Allen M.S., Blackmon S.H. From 3-Dimensional Printing to 5-Dimensional Printing: Enhancing Thoracic Surgical Planning and Resection of Complex Tumors. *Ann. Thorac. Surg.* 2016. V. 101(5). P. 1958-1962. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2015.12.075.

39. Figueroa-Cavazos J.O., Flores-Villalba E., Diaz-Elizondo J.A., Martinez-Romero O., Rodriguez C.A., Siller H.R. Design Concepts of Polycarbonate-Based Intervertebral Lumbar Cages: Finite Element Analysis and Compression Testing. *Appl. Bionics Biomech.* 2016. V. 2016. P. 7149182. DOI: 10.1155/2016/7149182.