

<https://doi.org/10.29296/25877305-2021-10-02>

Применение аддитивных технологий 3D-печати в травматологии-ортопедии и нейрохирургии

А.В. Яриков¹⁻⁵, кандидат медицинских наук,
Р.О. Горбатов⁶, кандидат медицинских наук,
И.И. Столяров²,
И.И. Смирнов²,
А.П. Фраерман², доктор медицинских наук, профессор,
А.Г. Соснин¹, кандидат медицинских наук,
О.А. Перльмуттер², доктор медицинских наук, профессор

¹Приволжский окружной медицинский центр
Федерального медико-биологического агентства России,
Нижний Новгород

²Городская клиническая больница №39, Нижний Новгород

³Центральная городская больница, Арзамас

⁴Центральная медико-санитарная часть №50
Федерального медико-биологического агентства России, Саров

⁵Городская клиническая больница №13, Нижний Новгород

⁶Приволжский исследовательский медицинский университет
Минздрава России, Нижний Новгород

E-mail: anton-yarikov@mail.ru

С каждым годом возрастает число медицинских специальностей, использующих аддитивные технологии для диагностики и лечения пациентов. Наиболее активно данные технологии используются в травматологии, ортопедии и нейрохирургии, о чем свидетельствуют научные публикации, разработанные методики терапии, число пролеченных пациентов. Увеличивается количество клиник и хирургов, использующих 3D-печатные макеты для предоперационного планирования. Благодаря аддитивным технологиям появляется возможность персонализации медицинских изделий и всесторонней визуализации зоны хирургического интереса. Отработка хирургических доступов и приемов позволяет сократить время операции и длительность наркоза, уменьшить травматизацию тканей и кровопотерю. Созданные с помощью 3D-печати имплантаты позволяют значительно улучшить результаты оперативного лечения пациентов травматолого-ортопедического и нейрохирургического профилей. Новые материалы и оборудование открывают новые возможности в развитии данного инновационного направления в медицине.

Ключевые слова: травматология, ортопедия, хирургия, 3D-печать, 3D-моделирование, аддитивные технологии, 3D-технология, 3D-принтер.

Для цитирования: Яриков А.В., Горбатов Р.О., Столяров И.И. и др. Применение аддитивных технологий 3D-печати в травматологии-ортопедии и нейрохирургии. Врач. 2021; 32 (10): 8–16. <https://doi.org/10.29296/25877305-2021-10-02>

В 1984 г. С.W. Hull разработал технологию послойного изготовления физических трехмерных объектов на основе их цифровых данных (3D-печать) и через 2 года ее запатентовал. Она получила название «стереолитография» [1–4]. Впоследствии предложены и другие

технологические решения послойного наращивания объектов, лежащие в основе работы 3D-принтера: ламинирование (Михаило Фейген); селективное лазерное спекание (Карл Декард); послойное уплотнение наносимого материала (Cubital, Израиль); послойное наложение расплавленной полимерной нити (Скотт Крамп) [5]. Стремительное развитие быстрого прототипирования с применением 3D-печати совершило революцию во многих производственных областях, включая медицину. С каждым годом возрастает число медицинских специальностей, в которых используются аддитивные технологии для диагностики и лечения пациентов. Наиболее активный рост в виде увеличения числа научных публикаций, разработанных методик терапии, пролеченных пациентов отмечается в травматологии, ортопедии и нейрохирургии [3, 4, 6–8]. Чаше всего 3D-печать в данных медицинских специальностях применяется для создания следующих объектов [3, 9–11]:

- макетов для обучения и предоперационного планирования;
- имплантатов, протезов, направителей, хирургических шаблонов, аппаратов внешней иммобилизации, ортопедических стелек и ортезов;
- одноразовых и многоразовых хирургических инструментов, компонентов для медицинского оборудования;
- тканевых и органных трехмерных конструкций на клеточной основе.

С каждым годом медицинская 3D-печать становится более доступной и дешевой, появляются новые материалы и оборудование, совершенствуются технологии аддитивного производства индивидуальных медицинских изделий. Если в начале 90-х гг. XX века персонифицированные титановые имплантаты применялись для лечения пациентов с обширными костными дефектами в единичных случаях, то сегодня их использование во многих клиниках мира стало повседневным. В настоящее время сформулированы показания для многих индивидуальных изделий медицинского назначения, изготовленных с помощью 3D-печати [4, 12–15]. С каждым годом совершенствуется и законодательная база их применения в медицине, позволяющая обеспечить эффективность использования и безопасность персонифицированных изделий для пациентов и при этом избежать правовых барьеров для развития данного инновационного направления [16].

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

В основе 3D-печати лежат принципы создания объемного изделия путем его послойного наращивания [17, 18]. Эту технологию также называют «быстрым прототипированием» или «аддитивным производством», в отличие от так называемого субтрактивного производства, в основе которого лежит удаление части материала (фрезерование, шлифование, точение

и др.) [19]. Первооткрывателями в этой области были В.Р. Altschuler (1973) и J. Swinson (1975), которые объединили систему автоматического проектирования (Computer Aided Design – CAD) и систему изготовления объектов с использованием компьютерных технологий (Computer Aided Manufacture – CAM) в единое производство [18, 20, 21]. CAD/CAM-производство, на базе которого строится создание 3D-моделей для медицины, обычно состоит из следующих этапов [4, 9, 18, 21]:

I. Сбор данных. При создании изделий медицинского назначения, как правило, используются данные, полученные при 3D-сканировании, мультиспиральной компьютерной (МСКТ) и (или) магнитно-резонансной томографии (МРТ).

II. Создание 3D-модели. Построение цифровой модели осуществляется либо «с нуля» в CAD/CAM, либо на основе результатов, полученных при 3D-сканировании, МСКТ и (или) МРТ. Данные обследований (чаще всего в формате Dicom) загружаются в программное обеспечение (например, 3D Sliser, Blender), в котором осуществляется создание 3D-модели анатомического объекта из набора слоев (томограмм).

III. Компьютерное моделирование. На данном этапе осуществляется компьютерное моделирование 3D-модели анатомического объекта, в том числе с использованием гибридного параметрического моделирования и топологической оптимизации; на ее основе создаются различные изделия медицинского назначения (например, имплантаты, направители, хирургические шаблоны и др.). Затем проводится проверка 3D-модели на наличие дефектов, деформаций, создается поддержка для ее 3D-печати.

IV. Слайсинг. Осуществляется разделение 3D-модели объекта, готового для 3D-печати, на слои с использованием Slicing-программ, которые переводят ее в физические инструкции для принтера. Они представляют собой последовательность траекторий, которую пройдет печатающая головка 3D-принтера, заполняя (печатающая) форму объекта.

V. Печать. Для аддитивного производства медицинских изделий в зависимости от технологии 3D-печати наиболее часто используют следующие виды 3D-принтеров: FDM (моделирование методом послойного наплавления); SLA (стереолитография или 3D-печать жидким фотоотверждаемым полимером); SLS (селективное лазерное спекание); DLSM (прямое лазерное спекание металла); биопринтеры.

VI. Постпечатная обработка. После завершения 3D-печати осуществляется удаление поддержек, обработка изделия в ультразвуковой камере, камере ультрафиолетового отверждения материала, шлифование и др.

3D-принтеры, применяемые в травматологии-ортопедии и нейрохирургии, могут стоить от \$ 500 за оборудование начального уровня (FDM) до \$ 150 000–900 000 за максимально точные SLS-, FDM-, DLSM-

и SLA-системы [22]. FDM является широко используемой технологией 3D-печати ввиду простоты и сравнительно низкой стоимости производства. SLS- и SLA-печать сопоставимы по точности получаемых моделей, при этом изделия в большинстве случаев превосходят по прочностным характеристикам аналоги, изготовленные на FDM 3D-принтере [17, 23].

Для создания индивидуальных имплантатов с помощью аддитивных технологий используют 3D-печать из биосовместимых материалов, изготовление матриц (пресс-форм), в которые в последующем заливается жидкий костнозамещающий материал или прототипирование [24].

КРАНИАЛЬНАЯ НЕЙРОХИРУРГИЯ

В связи с широким использованием в нейрохирургии декомпрессивных и резекционных краниоэктомий в настоящее время актуальной является проблема реконструкции послеоперационных дефектов черепа, зачастую сложных и обширных [25, 26]. Наиболее тяжелыми для замещения в силу особенностей геометрии, а также высокой функциональной и косметической нагрузки, являются дефекты лобно-глазничной локализации [27–29]. Использование аддитивных технологий способствует прецизионному планированию операции по напечатанным на 3D-принтере макетам черепа и максимально точному восстановлению утраченного его фрагмента с применением индивидуальных имплантатов [30–32]. 3D-печать позволяет осуществлять реконструкцию костных дефектов различной сложности, размеров, геометрической формы и анатомической локализации [33, 34]. Доступность программного обеспечения позволяет нейрохирургам принимать непосредственное участие в моделировании имплантатов [24].

Существуют 3 основные методики изготовления краниоимплантатов с помощью 3D-печати [2, 27]:

- 3D-печать имплантата из биосовместимых материалов (титан, керамика и др.) (рис. 1);
- изготовление имплантата с использованием индивидуального макета черепа пациента, созданного на 3D-принтере. Для этого печатают макет черепа и по нему вручную моделируют имплантат. При этом материалом для его изготовления может быть полиметилметакрилат (ПММА) или титан (рис. 2);
- изготовление имплантата с использованием его матрицы (пресс-формы), напечатанной на 3D-принтере.

Во всех методиках создания краниоимплантатов с помощью 3D-печати обязательным этапом является компьютерное моделирование, которое осуществляется тремя способами [2, 27]:

- построение вручную недостающего фрагмента черепа на его компьютерной 3D-модели с использованием гибридного параметрического моделирования. Данный способ является весьма трудоемким и требует точного знания анатомического строения и взаимоотношений костей черепа;
- симметричное «зеркальное» отражение. Данный способ эффективен при локализации дефекта с одной стороны от срединной сагиттальной плоскости черепа; реализация осуществляется путем «зеркального» отражения контрлатеральной неповрежденной кости;
- использование «виртуального донора». Способ применяется при отсутствии неповрежденной контрлатеральной кости. Из базы данных выбирают 3D-модель черепа «виртуального донора», сходную по анатомическому строению черепу пациенту, затем из нее выделяют необходимый фрагмент кости, который совмещают с зоной дефекта.

Одной из первых публикаций об использовании напечатанного макета черепа для предоперационного планирования была работа М. Abe и соавт. (1998 г.; Saga Medical School, Япония), которые сообщили об успешном использовании индивидуальных макетов черепа у 7 пациентов при планировании оперативных вмешательств по поводу посттравматических дефектов. По мнению нейрохирургов, данный способ предоперационного планирования позволяет лучше ориентироваться в сложной анатомии основания черепа и помогает уменьшить число хирургических осложнений [35].

В 2003 г. А. Müller и соавт. (Германия) сообщили о послеоперационных результатах успешного лечения 52 пациентов, которым выполнялось предоперационное планирование с использованием индивидуальных 3D-печатных макетов черепа. Пациенты были разделены на 3 группы в зависимости от вида операции:

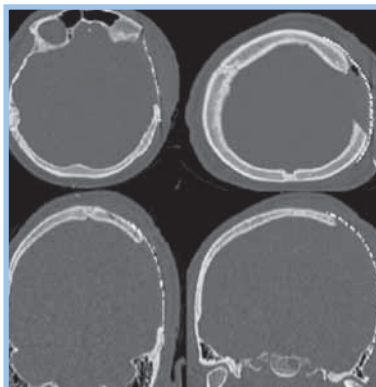


Рис. 1. Краниопластика, выполненная титановой пластиной «KONMET»; пластина изготовлена на DLMS-принтере

Fig. 1. Cranioplasty performed using a CONMET titanium plate; the plate has been made on a DLMS printer



Рис. 2. Макет черепа напечатан на 3D-принтере FDM; белым цветом напечатана зона костного дефекта, по которой будет изготавливаться титановый трансплантат

Fig. 2. The skull mock-up has been printed on a FDM 3D printer; the bone defect area has been printed in white, which has been used to make a titanium implant

1-я группа (n=26) – корректирующая краниопластика, выполненная после резекции опухолей костей черепа (n=15) и по поводу врожденных, посттравматических дефектов (n=11); 2-я группа (n=10) – реконструктивная краниопластика; 3-я группа (n=16) – сложные вмешательства в области основания черепа. Все макеты изготавливались на 3D-принтере SLA. Нейрохирурги отмечали уменьшение времени операции и числа операционных ошибок во всех группах, подчеркивая при этом, что 3D-модели обеспечивают лучшее понимание анатомии, интраоперационную точность локализации поражений [36].

В 2014 г. С.А. Еолчийн (Научно-исследовательский институт им. Н.Н. Бурденко, Москва) опубликовал результаты исследований, продемонстрировавших преимущества индивидуальных имплантатов, изготовленных по CAD/CAM-технологиям из титана, ПММА и PEEK-Optima, по сравнению с традиционными краниоимплантатами; показаны высокая точность имплантата, уменьшение травматичности, сокращение длительности операции и достижение наилучших косметических результатов [37].

В исследовании J. Nöhne и соавт. сравниваются результаты краниопластик, выполненных в 2006–2013 гг. с использованием двух видов имплантатов: 1-я группа (n=60) – имплантат, изготовленный интраоперационно из ПММА; 2-я группа (n=60) – сетка из титана, преформированная по 3D-печатному макету. Продолжительность операции во 2-й группе была достоверно ниже. Использование сеток из титана, преформированных по 3D-печатным макетам, позволило уменьшить у пациентов число послеоперационных осложнений и достичь наилучших косметических результатов [38].

В исследовании J.M. Luo и соавт. представлены результаты лечения 161 пациента, которым в 2005–2011 гг. произведена краниопластика. Пациенты в зависимости от вида имплантата были разделены на 2 группы: 1-я (n=78) – сетчатые имплантаты из титана, смоделированные во время операции; 2-я (n=83) – сетчатые титановые имплантаты, преформированные до операции с применением 3D-печатных макетов черепа. Авторами показано, что использование имплантатов, созданных по индивидуальным макетам черепа на дооперационном этапе, статистически достоверно уменьшает продолжительность операции, позволяет использовать меньше фиксирующих винтов, снижает количество послеоперационных осложнений, позволяет добиться лучших косметических результатов [39].

В 2016 г. в работе E.T.W. Tan и соавт. показано, что создание индивидуальных имплантатов может осуществлять и сам нейрохирург, владеющий навыками простого компьютерного моделирования. Исследователи предлагают использовать низкобюджетный настольный 3D-принтер FDM для изготовления пресс-форм из PLA-пластика. Таким образом, нейрохирург может са-

мостоятельно изготовить индивидуальный имплантат, не прибегая к помощи биоинженеров. По мнению исследователей, цена подобных имплантатов в несколько раз ниже аналогов, изготовленных по традиционным технологиям [40].

СПИНАЛЬНАЯ НЕЙРОХИРУРГИЯ

С развитием аддитивных технологий 3D-печати растет их использование в хирургическом лечении различных патологий позвоночника [41, 42].

В 1999 г. хирурги из Австралии впервые применили 3D-печатный макет позвоночника для предоперационного планирования [43]. В 2001 г. M. Van Dijk и соавт. сообщили об успешном хирургическом лечении с использованием аддитивных технологий 4 пациентов с опухолевыми заболеваниями позвоночника. Предоперационное планирование оптимальной резекции опухоли в соответствии с ее размерами, типом и локализацией выполнялось с применением макета позвоночника, напечатанного на 3D-принтере. Результаты исследования показали, что такой подход позволил выполнить диссекцию опухоли более безопасно, быстро и с меньшей кровопотерей [44].

В 2007 г. опубликованы результаты исследования (28 клинических случаев) по оценке эффективности применения индивидуальных 3D-печатных макетов позвоночника для предоперационного планирования. Для определения практической ценности методики проведено анкетирование вертебрологов. Согласно результатам исследования, среднее время операции сократилось на 17%; во всех случаях отмечена полноценная детализация макета (в 65,4% расценена как адекватная, в 34,6% – как необходимая). Вертебрологи, принявшие участие в опросе, предпочли бы выполнять предоперационное планирование с применением подобных макетов в похожих случаях. В 70% случаев они посчитали данный способ предоперационного планирования наиболее важным методом в подготовке к операции, в 89% случаев – для интраоперационной визуализации [45].

В 2010 г. группой исследователей из Китая опубликованы результаты пилотного исследования, целью которого было оценить целесообразность использования 3D-печатных макетов в хирургии сложных деформаций позвоночника (кифосколиозы). Исследование показало, что индивидуальные макеты позволяют улучшить результаты оперативного лечения. По сравнению с данными спондилографии, МСКТ, МРТ, компьютерной 3D-реконструкции, объекты, напечатанные на 3D-принтере, предоставляют важную тактильную и визуальную информацию, помогают вертебрологу спланировать операцию и повышают точность введения винтов [46].

Большой интерес представляет исследование, проведенное специалистами Shenzhen Institutes of Advanced Technology (Китай), отражающее точность

напечатанных макетов позвоночника на основании сопоставления их морфометрических параметров с данными МСКТ. Проведены измерения 44 параметров в шейном (ШОП), 120 – в грудном (ГОП), 50 – в поясничном (ПОП) отделах позвоночника. Статистически достоверных различий не выявлено ни по одному из параметров ($p > 0,05$). Межклассовый корреляционный коэффициент (Intraclass Correlation Coefficient – ICC) был $> 0,8$ для 88,6% параметров в ШОП, для 90% – в ГОП и для 94% – в ПОП. Для остальных параметров – $ICC > 0,6$. Таким образом, исследование продемонстрировало высокую степень соответствия напечатанных макетов позвоночника исходным параметрам МСКТ [47].

В 2018 г. А.В. Бурцев и соавт. показали эффективность методики компьютерного моделирования и 3D-печати индивидуальных направителей для фиксации ШОП. В направителях формировали отверстия диаметром 2,2 мм для прохождения сверла. Шаблон плотно прикладывали к дуге и остистому отростку позвонка, после чего с помощью высокоскоростного бора, а затем сверла формировали отверстие для введения транспедикулярного винта (ТПВ). В сформированное отверстие имплантировали ТПВ. На основании отработанной методики провели клиническую апробацию у 3 пациентов. По результатам МСКТ отмечено отклонение 1 ТПВ относительно заданной траектории на ≤ 2 мм, при этом мальпозиций не выявлено [42].

Р.А. Коваленко и соавт. (2019) анонсировали результаты лечения 16 пациентов, которым проводили имплантацию ТПВ в субаксиальные отделы ШОП и верхний отдел ГОП с использованием индивидуальных направителей, напечатанных на 3D-принтере. Всего установлено 88 ТПВ; средняя девиация от планируемой траектории составила $1,8 \pm 0,9$ мм. Девиацию 1-й степени (< 2 мм) зафиксировали для 57 (64,77%) ТПВ, 2-й (2–4 мм) – для 29 (32,95%), 3-й – для 2 (2,27%). Безопасность имплантации 0-й степени (ТПВ полностью находится внутри костной структуры) определена в 79 (89,77%) случаях, 1-й степени ($< 50\%$ диаметра ТПВ перфорируют кость) – в 5 (5,68%), 3-й – в 2 (2,27%). Использование индивидуальных направителей пред-

ставляется доступным и безопасным методом установки ТПВ в ШОП и ГОП. Метод может использоваться как альтернатива нейронавигации или интраоперационной МСКТ-навигации [48].

А.А. Снетков и соавт. (2020) представили результаты лечения 20 пациентов со сложной анатомией позвоночника (аномалии развития позвонков). У 9 пациентов имелись неклассифицируемые аномалии, у 11 – смешанные, у 3 – аплазия структур позвоночника. Пациенты были разделены на 2 группы: в 1-й группе ($n=10$) проводили стандартную предоперационную подготовку по данным спондилограмм, МСКТ и МРТ; во 2-й ($n=10$) – с использованием предварительно изготовленного 3D-печатного макета позвоночника. Во 2-й группе (использование аддитивных технологий) отмечено значительное улучшение результатов хирургического лечения (94,9% ТПВ без мальпозиции). В 1-й группе только в 78,1% случаев отсутствовала мальпозиция ТПВ. Авторы сделали вывод, что компьютерное моделирование и 3D-печать позволяют повысить точность установки ТПВ, снизить риск их мальпозиции, уменьшить риск повреждения невральных структур, сократить время операции и количество интраоперационных рентгеновских снимков [49].

Применение 3D-печати также нашло применение в изготовлении индивидуальных имплантатов для спинальной нейрохирургии, например кейджей (рис. 3).

ТРАВМАТОЛОГИЯ И ОРТОПЕДИЯ

Аддитивные технологии 3D-печати используют для диагностики и лечения различных патологий опорно-двигательного аппарата человека, включая переломы, костные опухоли, остеоартроз крупных суставов, врожденные и приобретенные деформации и др.

Одной из актуальных проблем современной медицины является лечение пациентов с костной онкопатологией. Рост заболеваемости как первичными опухолями, так и метастатическими поражениями костно-мышечной системы с каждым годом возрастает. Ежегодно диагностируется > 2900 случаев впервые выявленных остеогенных сарком. Кроме того, в кости метастазируют многие злокачественные заболевания. В исследовании, проведенном в ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Минздрава России, оценивали результаты хирургического лечения 22 пациентов с костными опухолями длинных трубчатых костей верхних конечностей. Всем пациентам после удаления опухоли выполнялась одномоментная костная пластика образовавшихся дефектов индивидуальными имплантатами из костнозамещающего вещества, изготовленными с применением технологий 3D-печати. У всех пациентов в послеоперационном периоде зафиксировано купирование болевого синдрома и улучшение функ-



Рис. 3. Индивидуальные кейджи ALIF (компания Ортоинвест)
Fig. 3. Individual ALIF cages (Ortho Invest Co.)

ции верхней конечности. За весь период наблюдения рентгенологические признаки миграции имплантатов не выявлены. При анкетировании через 1 год после операции у пациентов с доброкачественными новообразованиями получены следующие результаты: опросник SF-36 – $71,4 \pm 6,6$ балла, визуальная аналоговая шкала (ВАШ) – $2,5 \pm 1,5$ балла, шкала MSTS (Musculoskeletal Tumor Society Score) – $65,1 \pm 8,3\%$; у пациентов со злокачественными поражениями: SF-36 – $39,2 \pm 4,3$ балла, ВАШ – $4,8 \pm 1,4$ балла, MSTS – $41,8 \pm 5,2\%$ [12].

В работе С.С. Verasi и соавт. приводится опыт применения индивидуальных титановых ацетабулярных компонентов эндопротеза, изготовленных на 3D-принтере, при ревизионном эндопротезировании тазобедренного сустава у пациентов с катастрофической потерей костной ткани. Авторами выполнены 28 операций у 26 пациентов, повторная ревизия потребовалась 4 пациентам. Причинами неудач явились 2 случая перипротезной инфекции, 1 случай расшатывания бедренного компонента эндопротеза и 1 перипротезный перелом. Индивидуальные имплантаты показали хорошую выживаемость и отсутствие миграции или расшатывания при среднем сроке наблюдения 4,5 года. Авторы заключили, что результаты использования индивидуальных имплантатов сопоставимы с таковыми при применении антипротрузионных кейджей и аугментов. Однако в случаях серьезных дефектов вертлужной впадины с разобщением тазового кольца применение индивидуальных имплантатов может быть эффективнее [50].

Хорошие результаты лечения пациентов также получены и в исследовании по оценке клинко-рентгенологических результатов эндопротезирования коленного сустава с использованием индивидуальных направителей для позиционирования резекционных блоков, созданных с применением физических прототипов и 3D-печати. Авторы показали, что предоперационное планирование с использованием индивидуальных направителей и прототипирование на физических макетах большеберцовой и бедренной костей статистически достоверно позволило добиться нормализации оси нижней конечности у всех пациентов. Показаниями к применению персонализированных прецизионных направителей являются наличие в анамнезе воспалительного процесса или деформации бедренной кости, эндопротез тазобедренного сустава на ипсилатеральной стороне, когда желательно избежать вскрытия костномозгового канала, значительные костные дефекты или массивные остеофиты задних отделов мыщелков бедра, выраженное ограничение движений в коленном суставе [14].

С каждым годом растет число случаев применения аддитивных технологий в создании индивидуальных ортезов и ортопедических стелек. В исследовании [13] разрабатывали технологии изготовления инди-

видуальных ортопедических стелек с использованием 3D-печати. Исследователи не только достигли поставленной цели, но и показали, что во всех случаях статистически достоверно ($p < 0,05$) улучшились как результаты анкетирования по AOFAS, так и данные биомеханического обследования пациентов. Кроме того, использование в лечении пациентов индивидуальных ортопедических стелек, создаваемых с помощью 3D-печати, позволяет восстановить опороспособность конечности, купировать болевой синдром, а также приблизить походку к физиологической норме с восстановлением привычных нагрузок и улучшением качества жизни пациентов [13].

В исследовании [15] представлены результаты разработки технологии создания индивидуальных ортезов для иммобилизации суставов верхней конечности с помощью 3D-печати. Технология включает в себя измерение биометрических параметров области, необходимой для иммобилизации, создание по этим данным 3D-модели ортеза и последующее его изготовление на 3D-принтере FDM. Разработанные ортезы являются эффективным средством иммобилизации, показавшим отличные рентгенологические и клинические результаты лечения. Кроме того, они обладают следующими преимуществами по сравнению с традиционными технологиями их изготовления: персонализированность в зависимости от биометрических параметров пациента и вида патологии, малая масса, быстрая процедура наложения, влагостойкость, возможность теплообмена между поврежденной областью и окружающей средой [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в медицине отмечается большой интерес к применению аддитивных технологий. С каждым годом увеличивается число клиник и хирургов, использующих 3D-печатные макеты для предоперационного планирования. Благодаря аддитивным технологиям появляется возможность персонализации изделий медицинского назначения и всесторонней визуализации зоны хирургического интереса. Отработка хирургических доступов и приемов позволяет сократить время операции и длительность наркоза, уменьшить травматизацию тканей и кровопотерю. Создаваемые с помощью 3D-печати имплантаты позволяют значительно улучшить результаты оперативного лечения пациентов травматолого-ортопедического, вертебрологического и нейрохирургического профилей. Новые материалы и оборудование открывают новые возможности в развитии данного инновационного направления в медицине.

* * *

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Исследование не имело финансовой поддержки.

Литература/Reference

- Левченко О.В. Современные методы краниопластики. *Нейрохирургия*. 2010; 2: 5–13 [Levchenko O.V. Modern methods of cranioplasty. part 1. *Russian journal of neurosurgery*. 2010; 2: 5–13 (in Russ.)].
- Иванов О.В., Семичев Е.В., Шнякин П.Г. и др. Пластика дефектов черепа: от аутокости к современным биоматериалам (обзор литературы). *Медицинская наука и образование Урала*. 2018; 19 (3): 143–9 [Ivanov O.V., Semichev E.V., Shnyakin P.G. et al. Reconstruction of cranial bone defects from autotransplantation to modern biomaterials (review). *Meditsinskaya nauka i obrazovanie Urala*. 2018; 19 (3): 143–9 (in Russ.)].
- Баиндурашвили А.Г., Виссарионов С.В., Познович М.С. и др. Применение трехмерной печати в хирургии позвоночника и другой костной патологии. *Современные проблемы науки и образования*. 2019; 6: 194 [Baindurashvili A.G., Vissarionov S.V., Poznovich M.S. et al. The use of three-dimensional printing in spinal surgery and other bone pathology. *Modern problems of science and education*. 2019; 6: 194 (in Russ.)]. DOI: 10.17513/spno.29359
- Карякин Н.Н., Горбатов Р.О. 3D-печать в медицине. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2019; 240 с. [Karyakin N.N., Gorbato R.O. 3-D Printing in Medicine. M.: GEOTAR-Media, 2019; 240 s. (in Russ.)]. DOI: 10.33029/9704-5163-2-PRI-2019-1-240
- Нагибович О.А., Свистов Д.В., Пелешок С.А. и др. Применение технологии 3D-печати в медицине. *Клиническая патофизиология*. 2017; 23 (3): 14–22 [Nagibovich O.A., Svistov D.V., Peleshok S.A. et al. Application of 3D-printing technology in medicine. *Klinicheskaya patofiziologiya*. 2017; 23 (3): 14–22 (in Russ.)].
- Коваленко Р.А., Пташников Д.А., Черebilло В.Ю. и др. Применение индивидуальных 3D моделей в хирургии позвоночника – обзор литературы и первый опыт использования. *Российский нейрохирургический журнал им. профессора А.Л. Поленова*. 2018; 10 (3-4): 43–8 [Kovalenko R.A., Ptashnikov D.A., Cherebillo V.Yu. et al. Application of individual 3d printed models in spine surgery – literature review and the first experience. *Russian Journal of Neurosurgery*. 2018; 10 (3-4): 43–8 (in Russ.)].
- Кулешов А.А., Ветрилэ М.С., Шкарубо А.Н. и др. Аддитивные технологии в хирургии деформаций позвоночника. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2018; 4: 19–29 [Kuleshov A.A., Vetrile M.S., Shkarubo A.N. et al. Additive technologies in surgical treatment of spinal deformities. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2018; 4: 19–29 (in Russ.)]. DOI: 10.17116/vto201803-04119
- Кравчук А.Д., Маряхин А.Д., Потапов А.А. и др. Применение аддитивных технологий в нейрохирургии. В сб.: Аддитивные технологии: настоящее и будущее Мат-лы V междунар. конф. 2019; с. 253–74 [Kravchuk A.D., Maryakhin A.D., Potapov A.A. et al. Primenenie additivnykh tekhnologii v neirokhirurgii. V sb.: Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee Mat-ly V mezhdunar. konf. 2019; s. 253–74 (in Russ.)].
- Пелешок С.А., Железняк И.С., Овчинников Д.В. и др. Опыт применения аддитивных технологий в военно-медицинских организациях и военном инновационном технополисе «ЭРА». *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2019; 3 (67): 126–31 [Peleshok S.A., Zheleznyak I.S., Ovchinnikov D.V. et al. The experience of application of additive technologies in the military medical organizations and the military innovation technopolis «ERA». *Vestnik Rossiiskoi voenno-meditsinskoi akademii*. 2019; 3 (67): 126–31 (in Russ.)].
- Сафонов М.Г., Строгий В.В. Применение 3D-печати в медицине. *Международный студенческий научный вестник*. 2015; 3–3: 394–5 [Safonov M.G., Strogii V.V. Primenenie 3D-pechaty v meditsine. *Mezhdunarodnyi studencheskii nauchnyi vestnik*. 2015; 3–3: 394–5 (in Russ.)].
- Одинокова Э.А. 3D-печать в медицине. В сб.: Физика и медицина: создавая будущее сборник материалов. 2017; с. 140–5 [Odinokova E.A. 3D-pechat' v meditsine. V sb.: Fizika i meditsina: sozdavaya budushchee sbornik materialov. 2017; s. 140–5 (in Russ.)].
- Карякин Н.Н., Горбатов Р.О., Новиков А.Е. и др. Хирургическое лечение пациентов с опухолями длинных трубчатых костей верхних конечностей с использованием индивидуальных имплантатов из костнозамещающего материала, созданных по технологиям 3D-печати. *Гений ортопедии*. 2017; 23 (3): 323–30 [Karyakin N.N., Gorbato R.O., Novikov A.E. et al. Surgical treatment of patients with tumors of long bones of upper limbs using tailored 3D printed bone substitute implants. *Geniy ortopedii*. 2017; 23 (3): 323–30 (in Russ.)]. DOI: 10.18019/1028-4427-2017-23-3-323-330
- Карякин Н.Н., Горбатов Р.О. Технология создания индивидуальных ортопедических стелек с использованием 3D печати. *Современные проблемы науки и образования*. 2017; 3: 42 [Karyakin N.N., Gorbato R.O. Technology of creation of individual 3D printed orthopedic insoles. *Modern problems of science and education*. 2017; 3: 42 (in Russ.)].
- Карякин Н.Н., Малышев Е.Е., Горбатов Р.О. и др. Эндопротезирование коленного сустава с применением индивидуальных направителей, созданных с помощью технологий 3D-печати. *Травматология и ортопедия России*. 2017; 23 (3): 110–8 [Karyakin N.N., Malyshev E.E., Gorbato R.O. et al. 3D printing technique for patient-specific instrumentation in total knee arthroplasty. *Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2017; 23 (3): 110–8 (in Russ.)]. DOI: 10.21823/2311-2905-2017-23-3-110-118
- Горбатов Р.О., Казаков А.А., Романов А.Д. Разработка технологии создания индивидуальных ортезов для иммобилизации суставов верхней конечности с помощью 3D-печати. *Вестник ВолгГМУ*. 2018; 3 (67): 124–8 [Gorbato R.O., Kazakov A.A., Romanov A.D. Development of technology of creation of individual orthoses for the immobilization of joints of the top extremity by means of the 3D press. *Journal of VolgSMU*. 2018; 3 (67): 124–8 (in Russ.)]. DOI: 10.19163/1994-9480-2018-3(67)-124-128
- Карякин Н.Н., Шубняков И.И., Денисов А.О. и др. Правовое регулирование изготовления изделий медицинского назначения с использованием 3D-печати: современное состояние проблемы. *Травматология и ортопедия России*. 2018; 24 (4): 129–36 [Karyakin N.N., Shubnyakov I.I., Denisov A.O. et al. Regulatory Concerns about Medical Device Manufacturing Using 3D Printing: Current State of the Issue. *Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2018; 24 (4): 129–36 (in Russ.)]. DOI: 10.21823/2311-2905-2018-24-4-129-136
- Кравчук А.Д., Маряхин А.Д., Потапов А.А. и др. Применение аддитивных технологий в нейрохирургии. В сб.: Аддитивные технологии: настоящее и будущее. Мат-лы V междунар. конф. 2019; с. 253–74 [Kravchuk A.D., Maryakhin A.D., Potapov A.A. et al. Primenenie additivnykh tekhnologii v neirokhirurgii. V sb.: Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee. Mat-ly V mezhdunar. konf. 2019; s. 253–74 (in Russ.)].
- Багатурия Г.О. Перспективы использования 3D-печати при планировании хирургических операций. *Медицина: теория и практика*. 2016; 1 (1): 26–35 [Bagaturija G.O. Prospects for the use of 3D-printing when planning surgery. *Medicine: Theory and Practice*. 2016; 1 (1): 26–35 (in Russ.)].
- Приходько А.А., Виноградов К.А., Вахрушев С.Г. Меры по развитию медицинских аддитивных технологий в Российской Федерации. *Медицинские технологии. Оценка и выбор*. 2019; 2 (36): 10–5 [Prikhodko A.A., Vinogradov R.A., Vakhrushev S.G. Measures for the Development of Medical Additive Technologies in the Russian Federation. *Medical Technologies. Assessment and Choice*. 2019; 2 (36): 10–5. (in Russ.)]. DOI: 10.31556/2219-0678.2019.36.2.010-015
- Карпов О.Э., Гаврюшин С.С., Замятин М.Н. и др. Цифровые технологии в современной реконструктивной хирургии. *Вестник Национального медико-хирургического центра им. Н.И. Пирогова*. 2016; 11 (2): 3–8 [Karpov O.E., Gavryushin S.S., Zamjatin M.N. et al. Digital technology in modern reconstructive surgery. *Bulletin of Pirogov National Medical & Surgical Center*. 2016; 11 (2): 3–8 (in Russ.)].
- Потапов А.А., Коновалов А.Н., Корниенко В.Н. и др. Современные технологии и фундаментальные исследования в нейрохирургии. *Вестник Российской академии наук*. 2015; 85 (4): 299 [Potapov A.A., Konovalov A.N., Kornienko V.N. et al. Current technologies and basic research in neurosurgery. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2015; 85 (4): 299 (in Russ.)]. DOI: 10.7868/S086958731504009X
- Николаенко А.Н. Применение 3D-моделирования и трехмерной печати в хирургии (обзор литературы). *Medline.ru. Российский биомедицинский журнал*. 2018; 19 (1): 20–44 [Nikolaenko A.N. Application of 3D modeling and three-dimensional printing in surgery (review of literature). *Medline.ru. Rossiiskii biomeditsinskii zhurnal*. 2018; 19 (1): 20–44 (in Russ.)].
- Иванов В.П., Ким А.В., Хачатрян В.А. 3D-печать в краниофациальной хирургии и нейрохирургии. Опыт ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова». *Нейрохирургия и неврология детского возраста*. 2018; 3 (57): 28–39 [Ivanov V.P., Kim A.V., Khachatryan W.A. 3D-printing in craniofacial surgery and neurosurgery. experience of the Almazov national medical research centre. *Neirokhirurgiya i nevrologiya detskogo vozrasta*. 2018; 3 (57): 28–39 (in Russ.)].

24. Мишинов С.В., Ступак В.В., Копорушко Н.А. Краниопластика: обзор методик и новые технологии в создании имплантатов. *Современное состояние проблемы. Политравма*. 2018; 4: 82–9 [Mishinov S.V., Stupak V.V., Koporushko N.A. Cranioplasty: a review of methods and new technologies in implants manufacturing. *Polytrauma*. 2018; 4: 82–9 (in Russ.)].
25. Кравчук А.Д., Маряхин А.Д., Охлопков В.А. и др. Аддитивные технологии в реконструктивной хирургии дефектов черепа. В кн.: 3D-технологии в медицине. Мат-лы IV Всеросс. научно-практ. конф. 2019; с. 24–5 [Kravchuk A.D., Maryakhin A.D., Okhlopov V.A. et al. Additivnye tekhnologii v rekonstruktivnoi khirurgii defektov cherepa. V kn.: 3D-tekhnologii v meditsine Mat-ly IV Vseross. nauchno-prakt. konf. 2019; s. 24–5 (in Russ.)].
26. Ступак В.В., Копорушко Н.А., Мишинов С.В. и др. Эпидемиологические данные приобретенных дефектов черепа у больных, перенесших черепно-мозговую травму, на примере крупного промышленного города (Новосибирска). *Политравма*. 2019; 1: 6–10 [Stupak V.V., Koporushko N.A., Mishinov S.V. et al. Epidemiological data of acquired skull defects in patients after traumatic brain injury through the example of a big industrial city (Novosibirsk). *Polytrauma*. 2019; 1: 6–10 (in Russ.)].
27. Левченко О.В., Шалумов А.З., Крылов В.В. Использование безрамной навигации для пластического устранения костных дефектов лобно-глазничной локализации. *Анналы пластической, реконструктивной и эстетической хирургии*. 2011; 3: 30–6 [Levchenko O.V., Shalumov A.Z., Krylov V.V. Ispol'zovanie bezramnoi navigatsii dlya plasticheskogo ustraneniya kostnykh defektov lobnoglaznichnoi lokalizatsii. *Annaly plasticheskoi, rekonstruktivnoi i esteticheskoi khirurgii*. 2011; 3: 30–6 (in Russ.)].
28. Давыдов Д.В., Левченко О.В., Дробышев А.Ю. и др. Безрамная навигация в хирургическом лечении посттравматических деформаций и дефектов глазницы. *Практическая медицина*. 2012; 4–2 (59): 187–91 [Davydov D.V., Levchenko O.V., Drobyshev A.Y. et al. The frameless navigation in the surgical treatment of the post-traumatic deformities and orbital defects. *Prakticheskaya meditsina*. 2012; 4–2 (59): 187–91 (in Russ.)].
29. Левченко О.В., Михайлюков В.М., Давыдов Д.В. Безрамная навигация в хирургии посттравматических дефектов и деформаций краниоорбитальной области. *Нейрохирургия*. 2013; 3: 9–14 [Levchenko O.V., Mikhailiukov V.M., Davydov D.V. Frameless navigation system for surgical treatment of posttraumatic defects and craniorbitale deformations. *Russian journal of neurosurgery*. 2013; 3: 9–14 (in Russ.)]. DOI: 10.17650/1683-3295-2013-0-3-9-14
30. Иванов О.В., Семичев Е.В., Собакарь Е.Е. и др. Опыт пластики обширных дефектов черепа титановыми имплантатами. В сб.: Современные технологии лечения пациентов с травмой опорно-двигательного аппарата и центральной нервной системы. Сб. ст. научно-практ. конф. Под ред. Т.Г. Рукша. 2019; с. 97–102 [Ivanov O.V., Semichev E.V., Sobakar' E.E. et al. Opyt plastiki obshirnykh defektov cherepa titanovymi implantatami. V sb.: Sovremennye tekhnologii lecheniya patsientov s travmoy oporno-dvigatel'nogo apparata i tsentral'noi nervnoi sistemy. Sb. st. nauchno-prakt. konf. Pod red. T.G. Ruksha. 2019; s. 97–102 (in Russ.)].
31. Иванов О.В., Семичев Е.В., Собакарь Е.Г. и др. Опыт пластики дефектов черепа титановыми сетчатыми имплантатами в Сибирском научно-клиническом центре ФМБА России. В сб.: Актуальные вопросы современной хирургии. Сб. научно-практ. работ, посвящ. 70-летию зав. кафедрой общей хирургии им. проф. М.И. Гульмана КрасГМУ им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого заслуженного деятеля науки РФ, заслуженного врача России, академика РАЕН, профессора, доктора медицинских наук Юрия Семеновича Винника. 2018; с. 285–9 [Ivanov O.V., Semichev E.V., Sobakar' E.G. et al. Opyt plastiki defektov cherepa titanovymi setchatymi implantatami v Sibirskom nauchno-klinicheskom tsentre FMBA Rossii. V sb.: Aktual'nye voprosy sovremennoi khirurgii. Sb. nauchno-prakt. rabot, posvyashch. 70-letiyu zav. kafedroi obshchei khirurgii im. prof. M.I. Gul'mana KrasGMU im. prof. V.F. Voyno-Yasenetzkogo professora, doktora meditsinskikh nauk Yuriya Semenovicha Vinnika. 2018; s. 285–9 (in Russ.)].
32. Холодидов А.А., Яковлева А.В. Инновационное применение аддитивных технологий в медицине. *Молодой ученый*. 2019; 5 (243): 35–8 [Kholodilov A.A., Yakovleva A.V. Innovatsionnoe primeneniye additivnykh tekhnologii v meditsine. *Molodoi uchenyi*. 2019; 5 (243): 35–8 (in Russ.)].
33. Левченко О.В., Шалумов А.З., Крылов В.В. Пластика дефектов лобно-глазничной локализации с использованием безрамной навигации. *Нейрохирургия*. 2010; 3: 30–5 [Levchenko O.V., Shalumov A.Z., Krylov V.V. Plastic repair of fronto-orbital defects using frameless navigation. *Russian journal of neurosurgery*. 2010; 3: 30–5 (in Russ.)].
34. Копорушко Н.А., Ступак В.В., Мишинов С.В. и др. Этиология и эпидемиология приобретенных дефектов костей черепа, полученных при различной патологии центральной нервной системы, и число больных, нуждающихся в их закрытии, на примере крупного промышленного города. *Современные проблемы науки и образования*. 2019; 2: 120 [Koporushko N.A., Stupak V.V., Mishinov S.V. et al. Etiology and epidemiology of acquired defects of the skull bones, obtained with different pathologies of the central nervous system and the number of patients needing to their closed case for large industrial city. *Modern problems of science and education*. 2019; 2: 120 (in Russ.)].
35. Abe M., Tabuchi K., Goto M. et al. Model-based surgical planning and simulation of cranial base surgery. *Neural Med Chir (Tokyo)*. 1998; 38 (11): 746–50. DOI: 10.2176/nmc.38.746
36. Müller A., Krishnan K. G., Uhl E. et al. The application of rapid prototyping techniques in cranial reconstruction and preoperative planning in neurosurgery. *J Craniofac Surg*. 2003;14 (6): 899–914. DOI: 10.1097/00001665-200311000-00014
37. Еолчиан С.А. Пластика сложных дефектов черепа имплантатами из титана и полиэтерэтеркетона (ПЕЕК), изготовленными по CAD/CAM технологиям. *Журнал «Вопросы нейрохирургии» им. Н.Н. Бурденко*. 2014; 78 (4): 3–13 [Eolchiian S.A. Complex skull defects reconstruction with CAD/CAM titanium and polyetheretherketone (PEEK) implants. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N.N. Burdenko*. 2014; 78 (4): 3–13 (in Russ.)].
38. Höhne J., Werzmirzowsky K., Ott C. et al. Outcomes of cranioplasty with preformed titanium versus freehand molded polymethylmethacrylate implants. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg*. 2018; 79 (3): 200–5. DOI: 10.1055/s-0037-1604362
39. Luo J.M., Liu B., Xie Z.Y. et al. Comparison of manually shaped and computer shaped titanium mesh for repairing large frontotemporoparietal skull defects after traumatic brain injury. *Neurosurgery Focus*. 2012; 33 (1): 1–5. DOI: 10.3171/2012.2.focus129
40. Tan E.T.W., Ling J.M., Dinesh S.K. The feasibility of producing patient-specific acrylic cranioplasty implants with a low-cost 3D printer. *J Neurosurg*. 2016; 124 (5): 1531–7. DOI: 10.3171/2015.5.jns15119
41. Бурцев А.В., Губин А.В., Рябых С.О. и др. Применение 3D-моделирования и печати при задней стабилизации шейного отдела позвоночника винтовыми конструкциями. В кн.: 3D-технологии в медицине. Мат-лы IV Всеросс. научно-практ. конф. 2019; с. 10–1 [Burtsev A.V., Gubin A.V., Ryabykh S.O. et al. Primeneniye 3D-modelirovaniya i pechati pri zadnei stabilizatsii sheinogo otdela pozvonochnika vintovymi konstruksiyami. V kn.: 3D-tekhnologii v meditsine. Mat-ly IV Vseross. nauchno-prakt. konf. 2019; s. 10–1 (in Russ.)].
42. Бурцев А.В., Павлова О.М., Рябых С.О. и др. Компьютерное 3D-моделирование с изготовлением индивидуальных лекал для навигирования введения винтов в шейном отделе позвоночника. *Хирургия позвоночника*. 2018; 15 (2): 33–8 [Burtsev A.V., Pavlova O.M., Ryabykh S.O., Gubin A.V. Computer 3D-modeling of patient-specific navigational template for cervical screw insertion. *Hirurgiia pozvonochnika = Spine Surgery*. 2018; 15 (2): 33–8 (in Russ.)]. DOI: 10.14531/ss2018.2.33-38
43. D'Urso P., Askin G., Earwaker J. Spinal biomodeling. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1999; 24: 1247–51. DOI: 10.1097/00007632-199906150-00013
44. van Dijk M., Smit T.H., Jija T.U. et al. Polyurethane real-size models used in planning complex spinal surgery. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2001; 26: 1920–6. DOI: 10.1097/00007632-200109010-00020
45. Izatt M.T., Thorpe P.L.P.J., Thompson R.G. et al. The use of physical biomodelling in complex spinal surgery. *Eur Spine J*. 2007; 16: 1507–18. DOI: 10.1007/s00586-006-0289-3
46. Mao K., Wang Y., Xiao S. et al. Clinical application of computer-designed polystyrene models in complex severe spinal deformities: a pilot study. *Eur Spine J*. 2010; 19 (5): 797–802. DOI: 10.1007/s00586-010-1359-0
47. Wu A.-M., Shao Z.-X., Wang J.-S. et al. The Accuracy of a Method for Printing Three-Dimensional Spinal Models. *PLoS One*. 2015; 10 (4): e0124291. DOI: 10.1371/journal.pone.0124291
48. Коваленко П.А., Руденко В.В., Кашин В.А. и др. Применение индивидуальных 3D-навигационных матриц для транспедикулярной фиксации субаксиальных шейных и верхнегрудных позвонков. *Хирургия позвоночника*. 2019; 16 (2): 35–41 [Kovalenko P.A., Rudenko V.V., Kashin V.A. et al. Application of patient-specific 3D navigation templates for pedicle screw fixation of subaxial and upper thoracic vertebrae. *Hirurgiia pozvonochnika = Spine Surgery*. 2019; 16 (2): 35–41 (in Russ.)]. DOI: 10.14531/ss2019.2.35-41

49. Снетков А.А., Горбатьюк Д.С., Пантелеев А.А. и др. Анализ применения 3D-прототипирования при хирургической коррекции врожденных кифосколиозов. *Хирургия позвоночника*. 2020; 17 (1): 42–53 [Snetkov A.A., Gorbatyuk D.S., Panteleyev A.A. et al. Analysis of the 3D prototyping in the surgical correction of congenital kyphoscoliosis. *Hirurgiâ pozvonočnika = Spine Surgery*. 2020; 17 (1): 42–53 (in Russ.)]. DOI: 10.14531/ss2020.1.42-53

50. Berasi C.C., Berend K.R., Adams J.B. et al. Are custom triflange acetabular components effective for reconstruction of catastrophic bone loss? *Clin Orthop Relat Res*. 2014; 473 (2): 528–35. DOI: 10.1007/s11999-014-3969-z

APPLICATION OF ADDITIVE 3D PRINTING TECHNOLOGIES IN TRAUMATOLOGY/ORTHOPEDICS AND NEUROSURGERY

A. Yarikov¹⁻⁵, Candidate of Medical Sciences; **R. Gorbatov**⁶, Candidate of Medical Sciences; **I. Stolyarov**²; **I. Smirnov**²; Professor **A. Fraerman**², MD; **A. Sosnin**¹, Candidate of Medical Sciences; Professor **O. Perlmutter**², MD

¹Volga District Medical Center, Federal Biomedical Agency of Russia, Nizhny Novgorod

²City Clinical Hospital Thirty-Nine, Nizhny Novgorod

³Central City Hospital, Arzamas

⁴Central Medical and Sanitary Unit Fifty, Federal Biomedical Agency of Russia, Sarov

⁵City Clinical Hospital Thirteenth, Nizhny Novgorod

⁶Volga Research Medical University, Ministry of Health of Russia, Nizhny Novgorod

The number of medical specialties using additive technologies for the diagnosis and treatment of patients is increasing every year. There is the most active growth in the number of scientific publications, designed therapeutic procedures, and cured patients in traumatology, orthopedics, and neurosurgery. The number of clinics and surgeons using 3D-printed models for preoperative planning is growing every year. Owing to additive technologies, there is a possibility of personalized medicine products and comprehensive visualization of the area of surgical interest. Practicing surgical approaches and techniques allows one to shorten the time of surgery and the duration of anesthesia, to reduce tissue injury and blood loss. 3D printing implants can significantly improve the results of surgical treatment in traumatic, orthopedic, and neurosurgical patients. New materials and equipment open up new opportunities in the development of this innovative area in medicine.

Key words: traumatology, orthopedics, surgery, 3D printing, 3D modeling, additive technologies, 3D technology, 3D printer.

For citation: Yarikov A., Gorbatov R., Stolyarov I. et al. Application of additive 3D printing technologies in traumatology/orthopedics and neurosurgery. *Vrach*. 2021; 32 (10): 8–16. <https://doi.org/10.29296/25877305-2021-10-02>

Об авторax/About the authors: Yarikov A.V. ORCID: 0000-0002-4437-4480; Smirnov I.I. ORCID: 0000-0002-1766-9515; Fraerman A.P. ORCID: 0000-0003-3486-6124; Sosnin A.G. ORCID: 0000-0003-1370-3904; Perlmutter O.A. ORCID: 0000-0002-7934-14