

<https://doi.org/10.17238/2226-2016-2023-3-38-45>

УДК 617.3

© Е.Б. Калинин, А.М. Байрамкулов, Е.П. Тычина, А.В. Лычагин, П.И. Петров, М.М. Липина, Г.М. Кавалерский, В.И. Тельпухов, Е.Ю. Целищева, Я.А. Рукин, 2023

Оригинальная статья / Original article



ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ЭНДОПРОТЕЗИРОВАНИИ ПЛЕЧЕВОГО СУСТАВА

Е.Б. КАЛИНСКИЙ, А.М. БАЙРАМКУЛОВ, Е.П. ТЫЧИНА, А.В. ЛЫЧАГИН, П.И. ПЕТРОВ, М.М. ЛИПИНА, Г.М. КАВАЛЕРСКИЙ, В.И. ТЕЛЬПУХОВ, Е.Ю. ЦЕЛИЩЕВА, Я.А. РУКИН

ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), 119991, Москва, Россия

Аннотация

Введение. Аддитивные технологии заслуженно приобрели широкую популярность в медицине, биомоделирование демонстрирует высокую эффективность в ортопедии, расширяя возможности хирурга.

Цель. Улучшить результаты лечения пациентов со сложными деформациями плечевого сустава путем применения аддитивных технологий при эндопротезировании плечевого сустава.

Материалы и методы. В настоящем исследовании представлен клинический случай пациента М. 54 лет с диагнозом «деформирующий остеоартрит плечевого сустава III ст.». Пациенту по показаниям было выполнено эндопротезирование плечевого сустава с использованием аддитивных технологий: разработан и изготовлен имплант индивидуального дизайна из титана с остеоиндуктивной поверхностью и винтами с предустановленным направлением. Период наблюдения составил 12 месяцев; до операции и на контрольных осмотрах через 3, 6 и 12 месяцев производили опрос, физикальный осмотр, исследование объема движений, объективную оценку состояния пациента с помощью опросников VAS, SF-36 и UCLA.

Результаты. Применение персонализированного подхода и аддитивных технологий позволило восстановить функцию плечевого сустава и существенно улучшить качество жизни пациента. По всем опросникам получены достоверно значимые улучшения ($p < 0,05$), также отмечается восстановление объема движений плечевого сустава и тонуса дельтовидной мышцы.

Заключение. Результаты, полученные при применении аддитивных технологий у данного пациента, демонстрируют отличные результаты по всем исследуемым показателям, чего не всегда позволяет добиться рутинное эндопротезирование плечевого сустава у пациентов со сложными деформациями. Данное исследование доказывает эффективность современного персонализированного подхода и помогает улучшить результаты лечения пациентов ортопедического профиля.

Ключевые слова: эндопротезирование плечевого сустава, 3D-печать, остеоартрит.

Конфликт интересов: авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Калинин Е.Б., Байрамкулов А.М., Тычина Е.П., Лычагин А.В., Петров П.И., Липина М.М., Кавалерский Г.М., Тельпухов В.И., Целищева Е.Ю., Рукин Я.А., ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ЭНДОПРОТЕЗИРОВАНИИ ПЛЕЧЕВОГО СУСТАВА. КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ// Кафедра травматологии и ортопедии. Кафедра травматологии и ортопедии. 2023. № 3(53). С. 38–45 <https://doi.org/10.17238/2226-2016-2023-3-38-45>

Этическая экспертиза. Пациент подписал добровольное информированное согласие на участие в исследовании и дал согласие на обработку и публикацию клинического материала. Исследование одобрено этическим комитетом.

ENDOPROSTHETICS OF THE SHOULDER JOINT USING ADDITIVE TECHNOLOGIES

EUGENE B. KALINSKY, ANZOR M. BAIRAMKULOV, YEKATERINA P. TYCHINA, ALEXEY V. LYCHAGIN, PAVEL I. PETROV, MARINA M. LIPINA, GENNADIY M. KAVALERSKY, VLADIMIR I. TELPUKHOV, EVGENIYA Y. TSELISHEVA, YAROSLAV A. RUKIN

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russia (Sechenov University), 119991, Moscow, Russia

Abstract

Introduction. Additive technologies have gained widespread popularity in the medical field, particularly in orthopedics where biomodelling has proven to be highly effective in expanding the capabilities of surgeons.

Purpose of the study. Improving the results of treatment for patients with complex deformities of the shoulder joint through the use of additive technologies in shoulder endoprosthetics.

Materials and methods. Our study presents a clinical case of a 54-year-old patient, M, diagnosed with stage III shoulder deforming osteoarthritis. The patient underwent shoulder joint endoprosthetics using additive technologies. A custom-designed titanium implant with an osteoinductive surface and pre-set directional screws was developed and manufactured. The observation period was 12 months. Before the surgery and during follow-up examinations at 3, 6, and 12 months, interviews, physical examinations, range of motion measurements, and objective assessments of the patient's condition using the VAS, SF-36, and UCLA questionnaires were conducted.

Results. The application of a personalized approach and additive technologies allowed for the restoration of shoulder joint function and a significant improvement in the patient's quality of life. Significant improvements were obtained according to all questionnaires ($p < 0.05$), and restoration of shoulder joint range of motion and deltoid muscle tone were also noted.

Conclusion. The results obtained in the application of additive technologies in this patient demonstrate excellent results in all studied indicators, which are not always achievable with routine endoprosthesis of the shoulder joint in patients with complex deformities. This study proves the effectiveness of a modern personalized approach and helps improve the treatment outcomes for patients of orthopedic profile.

Key words: shoulder joint prosthesis, 3-Dimensional Printing, osteoarthritis.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Funding: the study had no sponsorship

For citation: Kalinsky E.B., Bairamkulov A.M., Tychina Y.P., Lychagin A.V., Petrov P.I., Lipina M.M., Kavalersky G.M., Tel'pukhov V.I., Tselisheva E.Y., Rukin Y.A., ENDOPROSTHETICS OF THE SHOULDER JOINT USING ADDITIVE TECHNOLOGIES. *Department of Traumatology and Orthopedics*. 2023. № 3. pp. 38–45 <https://doi.org/10.17238/2226-2016-2023-3-38-45>

Введение

Травмы области плечевого сустава составляют до 60% от общего числа скелетной травмы. Приблизительно 12% случаев остеоартрита (ОА) связывают с перенесенной травмой сустава. Возникающие при этом болевой синдром, снижение объема и амплитуды движений конечности, а также контрактуры существенно снижают качество жизни пациентов [22].

Деструктивные патологические процессы в суставах зачастую приводят к необходимости применения радикального хирургического лечения — эндопротезирования. Нередко, выраженная посттравматическая деформация препятствует проведению традиционных операций по эндопротезированию суставов.

С целью улучшения результатов эндопротезирования в настоящее время активно ведутся исследования по разработке и применению 3D-печати индивидуальных имплантов, резекционных шаблонов и направлятелей.

В последние годы техника трехмерной печати стала стремительно развиваться и внедряться в различные сферы здравоохранения, особенно в область ортопедической хирургии [1], где способы ее применения варьируются от печати моделей, используемых для предоперационного планирования до хирургических направляющих и анатомически точных персонализированных имплантатов [2]. Потребность в улучшении визуализации и качества результатов хирургического вмешательства привела к повышению интереса в вопросе 3D-печати для хирургического применения.

В процесс создания индивидуального имплантата в рамках аддитивных технологий в травматологии входят несколько клю-

чевых этапов. Выбор целевой области, создание 3D-геометрии данной части тела с помощью срезов, полученных с помощью магнитно-резонансной и компьютерной томографии (МРТ, КТ) и выбор подходящих материалов для 3D-принтера. В совокупности это дает анатомически точную модель, идентичную пораженной области у пациента. [12]

Сегодня в сфере аддитивных технологий возможно использование визуализации и создания трехмерных структур посредством использования 3D-принтера и подходящего сырья. Данная технология совершила существенный прорыв в создании многих видов моделей, вне зависимости от сложности их структуры и состава, за что она была признана во многих научных и технических областях. В медицине трехмерная печать получила наибольшее распространение в области ортопедии, ортодонтии, сердечно-сосудистой хирургии. [2,20,21]

В данной работе описан клинический случай сложного эндопротезирования плечевого сустава с применением персонализированного современного подхода. Будут раскрыты этапы подготовки, планирования и выполнения операции с использованием аддитивных 3D-технологий, индивидуальных резекционных шаблонов и направлятелей. Будут показаны ранние и среднесрочные результаты лечения.

Цель исследования

Улучшить результаты лечения пациентов со сложными деформациями плечевого сустава путем применения аддитивных технологий при эндопротезировании плечевого сустава.

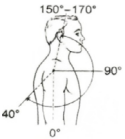
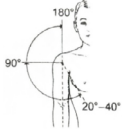
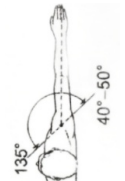
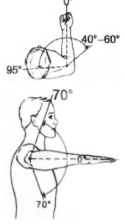
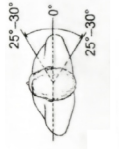
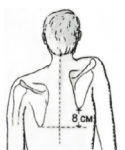
Материалы и методы

В клинику обратился Пациент М., 54 лет с жалобами на болевой синдром, постоянного ноющего характера, который усиливается в вечернее и ночное время, возникает как в покое, так и на высоте физической нагрузки; ограничение объема движений. Патологическое состояние пациента привело к ограничению повседневной и рабочей активности и, как следствие, к снижению качества жизни. Пациенту установлен диагноз: «деформирующий остеоартрит плечевого сустава III ст. Смешанная контрактура плечевого сустава. Болевой синдром» с последующей госпитализацией для проведения планового оперативного лечения.

В результате физикального обследования была отмечена смешанная контрактура плечевого сустава и гипотрофия дельтовидной мышцы правого плеча. По VAS боль была оценена пациентом в 90 баллов, SF-36 в 20% и UCLA в 22 балла. Был измерен объем движений в плечевом суставе через ноль-проходящий метод. Нами были изучены переднее и горизонтальное сгибание и разгибание, а также приведение, отведение, ротация, ретракция и протракция на разных временных промежутках наблюдения за пациентом для оценки динамики. В результате первичной оценки выражено снижение амплитуды движений (табл. 1).

Таблица 1

Объем движений в плечевом суставе у пациента М. на контрольных осмотрах (нейтральное положение – ноль)

	Объем движений в плечевом суставе	Перед операцией	3 мес. после операции	6 мес. после операции	12 мес. после операции
Переднее сгибание и разгибание (N=160°/40°)		70°/5°	90°/20°	125°/25°	130°/25°
Отведение и приведение (N=180°/30°)		50°/15°	90°/20°	110°/20°	110°/20°
Горизонтальное сгибание и разгибание (N=135°/45°)		Н/О	100°/10°	110°/20°	120°/20°
Наружная ротация и внутренняя ротация (N=70°/70°)		10°/15°	20°/20°	30°/20°	30°/20°
Протракция и ретракция плечевого сустава (N=30°/30°)		20°/20°	20°/20°	20°/20°	20°/20°
Подъем и опускание лопатки (N=8 см)		6 см	6 см	6 см	6 см

Результаты мультиспиральной компьютерной томографии показали признаки выраженной деформации суставных поверхностей, остеофитов, субхондрального склероза, значительного сужения суставной щели, кистовидной перестройки головки плечевой кости и суставного отростка лопатки. (Рис. 1)

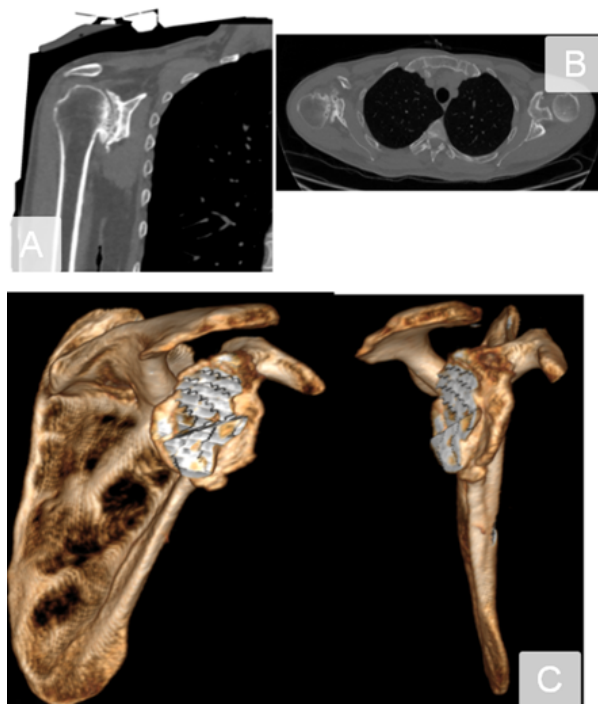


Рисунок 1. МСКТ правого плечевого сустава пациента М до операции.

При оценке клинико-рентгенологических данных в ходе предоперационного планирования мы пришли к заключению о необходимости нестандартного индивидуального решения, в связи с отсутствием технической возможности применения стандартной методики эндопротезирования. **Первым этапом** была произведена печать пластиковой анатомически точной копии лопатки на основе данных МСКТ (рис. 2А). Была распечатана 3D-копия лопатки пациента масштабированная по МСКТ, которая была использована для проектирования персонализированного импланта в рамках предоперационного планирования. Была оценена и определена характеристика опорной поверхности гленоида (Рис. 2В).

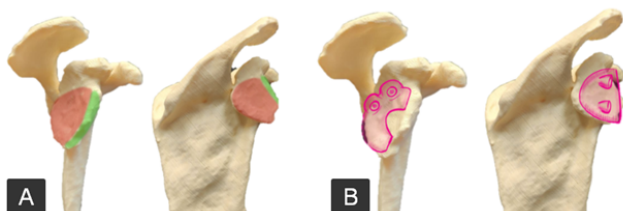


Рисунок 2. Пластиковая анатомическая модель лопатки пациента. А-особенности патологической анатомии; В-дизайн опорного импланта.

Имплант для пациента был изготовлен на принтере Concept laser M2 в формате трехмерной печати из титанового сплава ВТ6 с остеоиндуктивной поверхностью и винты с предустановленным направлением, для закрепления на ости лопатки. Этот металлический сплав был выбран из-за его относительно низкой жесткости, хороших механических свойств, легкого веса, коррозионной стойкости и биосовместимости. Точность печати составила ± 0.2 мм. Общее время изготовления всех имплантатов составила 38 часов.

Вторым этапом мы приступили к предоперационному планированию и подготовке. После того как был создан трехмерный дизайн аугмента, разработанный совместно с компанией TIOS, мы соединили масштабированную пластиковую анатомическую модель лопатки пациента с напечатанным аугментом для оценки их совместимости, особенностей фиксации и создания необходимой опорной площади для лопаточного компонента эндопротеза (Рис. 3).

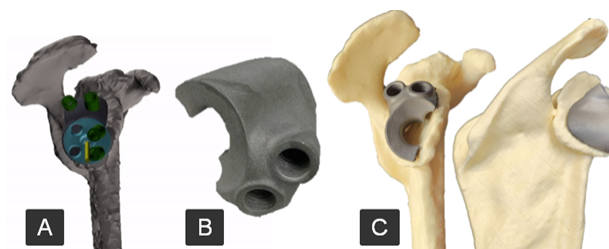


Рисунок 3. А - Компьютерный дизайн 3D-аугмента. В - распечатанный 3D-аугмент. С - фотография аугмента, совмещенного с анатомической моделью лопатки пациента

Следующей задачей, требующей решения стала фиксация аугмента, с последующей установкой компонентов эндопротеза. Для корректной навигации винтов, фиксирующих аугмент были разработаны индивидуальные 3D-направители. В ходе предоперационного планирования был рассчитан оптимальный уровень и наклон опилов плечевой кости, а также позиционирование гленоидного компонента. С этой целью были созданы индивидуальные трехмерные резекционные шаблоны и направлятели, разработанные с учетом особенностей патологической анатомии данного пациента (Рис. 4).

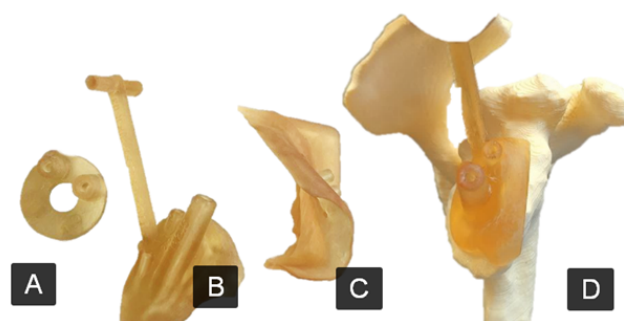


Рисунок 4. Индивидуальные направлятели.

Третьим этапом после подготовки и планирования была выполнена операция. Операцию проводили под общим комбинированным эндотрахеальным наркозом в положении больного «сидя в пляжном кресле». Выполнен стандартный дельтовидно-пекторальный хирургический доступ к плечевому суставу. С применением индивидуального резекционного шаблона, выполненным в геометрической форме, совпадающей с патологической анатомией пациента, выполнен опил плечевой кости с учетом предоперационного планирования. Следующим этапом выполнено иссечение рубцовой ткани и подготовка ложа для 3D-аугмента. Использованием индивидуальных направлятелей выполнено позиционирование и фиксация последнего в зоне суставного отростка лопатки. Направление фиксирующих винтов также было задано индивидуальными направлятелями, согласно тому как мы запланировали заранее. Окончанием основного этапа операции стало установка компонентов тотального реверсивного эндопротеза плечевого сустава (Рис. 5). Длительность операции составила 70 мин. Объем периоперационной кровопотери не превысил 500 мл.

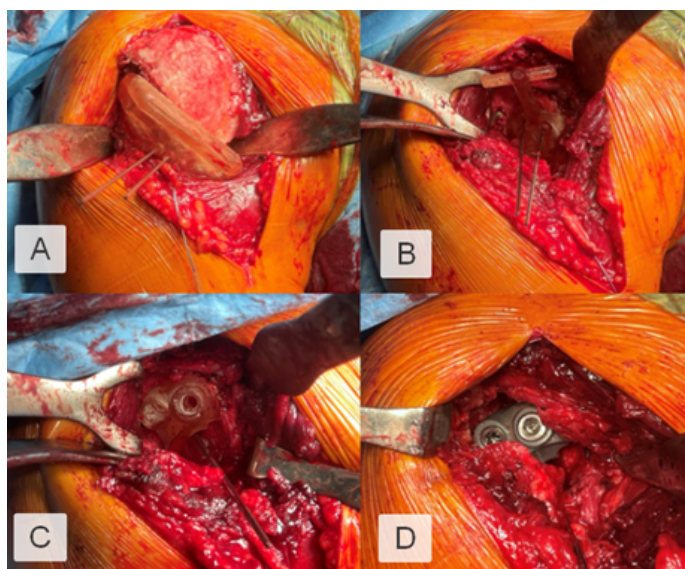


Рисунок 5. Интраоперационный вид А. резекционный шаблон; В,С,Д - подготовка и установка аугмента с использованием индивидуальных шаблонов

В результате эндопротезирования были восстановлены ретроверсия головки плечевой кости и антеверсия гленоида, функция правого плечевого сустава пациента в целом. Несмотря на длительную контрактуру и деформацию сустава, послеоперационный период имел крайне положительную динамику: на 12 неделю после операции отмечалось снижение болевого синдрома и восстановление дельтовидной мышцы (появление контуров, увеличение диапазона движений, увеличение ее передней части).

Результаты

Объективные результаты лечения пациента представлены на рисунке 6. Отмечается достоверно значимое улучшение сравнению с исходным состоянием ($p < 0,05$).

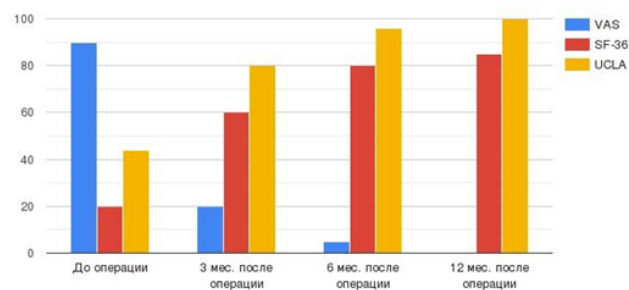


Рисунок 6. Результаты лечения пациента М. по данным опросников на контрольных осмотрах.

При использовании технологии 3D-печати в результате эндопротезирования были восстановлены ретроверсия головки плеча и антеверсия гленоида, возобновлены функции правого плечевого сустава. В послеоперационном периоде наблюдалось уменьшение болевого синдрома с 90 до 20 баллов по визуально-аналоговой шкале боли уже на 12 неделе после операции ($p < 0,05$), а также восстановление дельтовидной мышцы, которая является ключевой при реверсивном эндопротезировании. Несмотря на длительное существование контрактур и грубой деформации сустава, была отмечена крайне положительная динамика восстановления и увеличения объема движений, появились контуры дельтовидной мышцы и увеличение ее передней порции (Рис. 7, 8). Благодаря операции пациент полностью избавился от болевого синдрома (VAS), что внесло существенный вклад в улучшение его качества жизни (SF-36). На отметке полгода после операции наблюдается полное восстановление объема движений, хорошая сила мышц, отсутствие жалоб, пациент вернулся к профессиональной активной жизни.



Рисунок 7. Контрольная послеоперационная рентгенограмма пациента М.



Рисунок 8. Отведение оперированной руки пациента
М. через 3 мес. после операции

Обсуждение

Даже недавно появившиеся программы 3D-изображений в МРТ и КТ, позволяющие разобраться в клинических случаях при комплексных патологиях, не всегда имеют чувство осязаемости, что нередко нужно хирургам при планировании операций и выборе дальнейшей тактики лечения. В данном случае объекты, распечатанные на 3D-принтере, будут способствовать не только хирургическому лечению сложных кейсов, но и обучению молодых специалистов. [4]

Последние исследования показывают, что использование моделей различных переломов и других травм в натуральную величину способно внести значительный вклад в повышение качества обучения студентов-медиков в области травматологии и ортопедии [14]. В итоге обеспечивается лучшее понимание комплексной анатомии травмы, уникальной для каждого конкретного случая, и дальнейшее хранение моделей редких клинических случаев для обучения [15].

Анализ материалов и результатов лечения привел к выводу о том, что создание точной анатомической копии патологической области и последующего имплантата с помощью МРТ- и КТ-исследований позволяет не только заменить поврежденную кость, но и провести надлежащее предоперационное планирование с наиболее подходящей тактикой операции. [6, 23] Использование 3D-печати в предоперационном планировании также позволяет определить точные размер, позицию и направление будущего имплантата. В совокупности это даст возможность сильно уменьшить время операции, кровопотерю, лучевую нагрузку. В дополнение, из-за понижения степени вовлечение соседних интактных тканей и структур, падает риск послеоперационных осложнений и репозиции имплантата, что в итоге и предоставит более оптимистичные ожидания от лечения и реабилитации больного и снизит общую стоимость операций. [7,16,17] Это также укрепляет взаимоотношения между пациентом и хирургом, что является одним из приоритетов оказания медицинских услуг. Следует отметить, что в данный момент большая часть имплантатов, используемых в ортопедии, подчиняются концепции «один размер подходит всем». Однако, у размерный ряд довольно ограничен. Произ-

водство ортопедических имплантатов для конкретного пациента с использованием технологии 3D-печати позволяет избежать осложнений, возникающих из-за несоответствия размеров имплантатов и особенностей анатомии человека [8,9,10]. Помимо анатомического соответствия хирургическим требованиям пациента, имплантаты, созданные с помощью 3D-печати могут быть изготовлены с каркасными решетками, которые могут облегчить остеоинтеграцию и уменьшить жесткость импланта [11].

Трехмерная печать значительно улучшает визуализацию патологии хирургом. Данное свойство дает несомненные преимущества в проведении хирургических вмешательств, и также повышает уровень оказания медицинской помощи, обучения специалистов, персонализации и общей доступности в целом [19].

Использование методики 3D-печати, несмотря на свои преимущества и потенциал, все еще ограничено в ортопедической хирургии из-за недостаточных знаний и умений в работе хирургов. Вдобавок, ее использование затормаживается из-за невозможности точно воспроизвести мягкие ткани, такие как связки и суставные поверхности [3]. Положительным моментом является тот факт, что печать таких ригидных тканей, как костная не составляет больших трудностей. Материалами, используемыми в 3D-печати для моделирования костной ткани, являются, например, акрилонитрилбутадиенстирол и гидрохинон. [13, 14]

В данном клиническом случае мы обследовали пациента, в результате чего пришли к выводу, что лечение с использованием традиционных методов нецелесообразно, поэтому была разработана индивидуальная концепция лечения. После обнаружения резко уменьшенной опорной площадки гленоида, в рамках предоперационного планирования, для восстановления суставной поверхности была создана виртуальная 3D-конструкция. Впоследствии были распечатаны 3х-мерная конструкция и копия деформированной лопатки пациента. Для правильной навигации в условиях столь сильной деформации также возникла потребность в индивидуальных резекционных шаблонах и направлятелях. После выполнения операции пациент был направлен на реабилитацию. На контрольном осмотре в 6 месяцев отмечалось существенное увеличение объема движений, силы мышц и полное избавление от болевого синдрома.

Заключение

Персонализированный для пациента направляющий шаблон, и созданная точная копия поврежденной лопатки для предоперационного планирования, основанные на технологии 3D-печати, были рассмотрены как многообещающие методы, которые позволяют простым и удобным способом добиться меньшего отклонения и более высокой точности во время операции, уменьшить лучевую нагрузку и кровопотерю, а также ускорить восстановление пациента и вернуть прежнее качество жизни. Данный кейс является первым случаем использования

метода 3D-печати для проведения эндопротезирования плечевого сустава у пациента с недостаточной площадью опоры гленоида для импланта.

Список литературы / References:

1. Duan X., Wang B., Yang L., Kadakia A. R. Applications of 3D printing technology in orthopedic treatment. *BioMed Research International* . 2021;2021:3. doi: 10.1155/2021/9892456
2. Tack P, Victor J, Gemmel P, Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *Biomed Eng Online*. 2016 Oct 21;15(1):115. doi: 10.1186/s12938-016-0236-4. PMID: 27769304; PMCID: PMC5073919
3. Alemayehu DG, Zhang Z, Tahir E, Gateau D, Zhang DF, Ma X. Pre-operative Planning Using 3D Printing Technology in Orthopedic Surgery. *Biomed Res Int*. 2021 Oct 12;2021:7940242. doi: 10.1155/2021/7940242. PMID: 34676264; PMCID: PMC8526200.
4. Wurm G, Tomancok B, Pogady P, Holl K, Trenkler J. Cerebrovascular stereolithographic biomodeling for aneurysm surgery. *J Neurosurg*. 2004;100(1):139–145. doi: 10.3171/jns.2004.100.1.0139
5. D'Urso PS, Earwaker WJ, Barker TM, Redmond MJ, Thompson RG, Effeney DJ, et al. Custom cranioplasty using stereolithography and acrylic. *Br J Plast Surg*. 2000;53(3):200–204. doi: 10.1054/bjps.1999.3268
6. Zhang YD, Wu RY, Xie DD, Zhang L, He Y, Zhang H. [Effect of 3D printing technology on pelvic fractures: a Meta-analysis]. *Zhongguo Gu Shang*. 2018 May 25;31(5):465–471. Chinese. doi: 10.3969/j.issn.1003-0034.2018.05.013. PMID: 29890808
7. Duncan JM, Nahas S, Akhtar K, Daurka J. The Use of a 3D Printer in Pre-operative Planning for a Patient Requiring Acetabular Reconstructive Surgery. *J Orthop Case Rep*. 2015;5(1):23–25. doi:10.13107/jocr.2250-0685.247
8. Van Genechten W, Van Tilborg W, Van den Bempt M, Van Haver A, Verdonk P. Feasibility and 3D Planning of a Novel Patient-Specific Instrumentation Technique in Medial Opening-Wedge High Tibial Osteotomy. *J Knee Surg*. 2021;34(14):1560–1569. doi:10.1055/s-0040-1710379
9. Mobbs R. J., Coughlan M., Thompson R., Sutterlin C. E., Phan K. The utility of 3D printing for surgical planning and patient-specific implant design for complex spinal pathologies: case report. *Journal of Neurosurgery. Spine* . 2017;26(4):513–518. doi: 10.3171/2016.9.SPINE16371
10. Qiu B., Liu F., Tang B., et al. Clinical study of 3D imaging and 3D printing technique for patient-specific instrumentation in total knee arthroplasty. *The Journal of Knee Surgery* . 2017;30(8):822–828. doi: 10.1055/s-0036-1597980.
11. Wong KC. 3D-printed patient-specific applications in orthopedics. *Orthop Res Rev*. 2016 Oct 14;8:57–66. doi: 10.2147/ORR.S99614. PMID: 30774470; PMCID: PMC6209352.
12. Aimar A, Palermo A, Innocenti B. The Role of 3D Printing in Medical Applications: A State of the Art. *J Healthc Eng*. 2019 Mar 21;2019:5340616. doi: 10.1155/2019/5340616. PMID: 31019667; PMCID: PMC6451800.
13. Helguero C. G., Mustahsan V. M., Parmar S., et al. Biomechanical properties of 3D-printed bone scaffolds are improved by treatment by CRFP. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. 2017;12(1):p. 195. doi: 10.1186/s13018-017-0700-2.
14. Garcia J., Yang Z., Mongrain R., Leask R. L., Lachapelle K. 3D printing materials and their use in medical education: a review of current technology and trends for the future. *BMJ Simulation and Technology Enhanced Learning*. 2017;4(1):27–40. doi: 10.1136/bmjstel-2017-000234.
15. Frame M., Huntley J. S. Rapid prototyping in orthopaedic surgery: a user's guide. *Scientific World Journal*. 2012;2012:7. doi: 10.1100/2012/838575.838575
16. Diment L. E., Thompson M. S., Bergmann J. H. M. Clinical efficacy and effectiveness of 3D printing: a systematic review. *BMJ Open*. 2017;7(12) doi: 10.1136/bmjopen-2017-016891.e016891
17. O'Brien E., Wayne D. B., Barsness K. A., McGaghie W. C., Barsuk J. H. Use of 3D printing for medical education models in transplantation medicine: a critical review. *Current Transplantation Reports*. 2016;3(1):109–119. doi: 10.1007/s40472-016-0088-7.
18. Jones D. B., Sung R., Weinberg C., Korelitz T., Andrews R. Three-dimensional modeling may improve surgical education and clinical practice. *Surgical Innovation*. 2016;23(2):189–195. doi: 10.1177/1553350615607641.
19. Aimar A, Palermo A, Innocenti B. The Role of 3D Printing in Medical Applications: A State of the Art. *J Healthc Eng*. 2019 Mar 21;2019:5340616. doi: 10.1155/2019/5340616. PMID: 31019667; PMCID: PMC6451800.
20. Kurenov S. N., Ionita C., Sammons D., Demmy T. L. Three-dimensional printing to facilitate anatomic study, device development, simulation, and planning in thoracic surgery. *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2015;149(4):973–979. doi: 10.1016/j.jtcvs.2014.12.059.
21. Auricchio F., Marconi S. 3D printing: clinical applications in orthopaedics and traumatology. *EFORT Open Reviews*. 2016;1(5):121–127. doi: 10.1302/2058-5241.1.000012.
22. Bain, Gregory I., et al., eds. Normal and pathological anatomy of the shoulder. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.
23. Hu P, Sun J, Wei F, Liu X. Patient-Tailored 3D-Printing Models in the Subspecialty Training of Spinal Tumors: A Comparative Study and Questionnaire Survey. *World Neurosurg*. 2022 May;161:e488–e494. doi: 10.1016/j.wneu.2022.02.042. Epub 2022 Feb 19. PMID: 35189420.

Информация об авторах:

Калинский Евгений Борисович – кандидат медицинских наук, доцент кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф ФГАОУ ВО Первого МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, 119991, Россия e-mail kalinskiy_e_b@staff.sechenov.ru

Байрамкулов Анзор Муратович – студент ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), 119991, Москва, Россия, e-mail anzor.bay.00@mail.ru

Тычина Екатерина Павловна – студент ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), 119991, Москва, Россия, e-mail ekaterinn.ty@gmail.com

Алексей Владимирович Лычагин – доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой травматологии, ортопедии и хирургии катастроф ФГАОУ ВО Первого МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, 119991, Россия. E-mail: lychagin_a_v@staff.sechenov.ru

Павел Игоревич Петров – кандидат медицинских наук, ассистент кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф ФГАОУ ВО Первого МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, 119991, Россия. E-mail:

Марина Михайловна Липина – кандидат медицинских наук, доцент кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф ФГАОУ ВО Первого МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, 119991, Россия. E-mail: lipina_m_m@staff.sechenov.ru;

Геннадий Михайлович Кавалерский – доктор медицинских наук, профессор кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф ФГАОУ ВО Первого МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, 119991, Россия. E-mail:

Владимир Иванович Тельпухов – доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии ФГАОУ ВО Первого МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, 119991, Россия. E-mail: telpukhov_v_i@staff.sechenov.ru.

Евгения Юрьевна Целищева – кандидат медицинских наук, доцент кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф ФГАОУ ВО Первого МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, 119991, Россия. E-mail:

Ярослав Алексеевич Рукин – кандидат медицинских наук, доцент кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф ФГАОУ ВО Первого МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, 119991, Россия. E-mail:

Автор, ответственный за переписку:

Калинский Евгений Борисович, e-mail kalinskiy_e_b@staff.sechenov.ru

Information about authors:

Eugene B. Kalinsky – Candidate of Medical Sciences, associate professor at Department of traumatology, orthopedics and disaster surgery, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, 119991, Russia. e-mail kalinskiy_e_b@staff.sechenov.ru

Anzor M. Bairamkulov – student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russia (Sechenov University), 119991, Moscow, Russia, e-mail anzor.bay.00@mail.ru

Yekaterina P. Tychina – student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russia (Sechenov University), 119991, Moscow, Russia, e-mail ekaterinn.ty@gmail.com

Alexey V. Lychagin – Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of traumatology, orthopedics and disaster surgery, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University) Moscow, 119991, Russia. E-mail: lychagin_a_v@staff.sechenov.ru

Pavel I. Petrov – Candidate of Medical Sciences, assistant professor at Department of traumatology, orthopedics and disaster surgery, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, 119991, Russia. E-mail:

Marina M. Lipina – Candidate of Medical Sciences, associate professor at Department of traumatology, orthopedics and disaster surgery, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, 119991, Russia. E-mail: lipina_m_m@staff.sechenov.ru

Gennadiy M. Kavalersky – Doctor of Medical Sciences, Professor of the Department of traumatology, orthopedics and disaster surgery, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University) Moscow, 119991, Russia. E-mail:

Vladimir I. Telpukhov – Doctor of Medical Sciences, professor, at the Department of Operative Surgery and Topographic Anatomy, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, 119991, Russia. E-mail: telpukhov_v_i@staff.sechenov.ru.

Evgeniya Y. Tselisheva – Candidate of Medical Sciences, associate professor at Department of traumatology, orthopedics and disaster surgery, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, 119991, Russia. E-mail:

Yaroslav A. Rukin – Candidate of Medical Sciences, associate professor at Department of traumatology, orthopedics and disaster surgery, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, 119991, Russia. E-mail:

Corresponding author:

Eugene B. Kalinsky, e-mail kalinskiy_e_b@staff.sechenov.ru