

ПРИМЕНЕНИЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПЕРСОНИФИЦИРОВАННОМ ПОДХОДЕ К НАКОСТНОМУ ОСТЕОСИНТЕЗУ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

А.С. Панкратов, Ю.В. Ларцев, А.А. Рубцов, Д.А. Огурцов, Ю.Д. Ким, А.В. Шмельков, Н.А. Князев

Самарский государственный медицинский университет, Самара

Резюме. Появление технологии обработки изображений и трёхмерной печати открывает множество возможностей для применения в травматологии и ортопедии с учётом особенностей пациента. Современные способы медицинской визуализации с высоким разрешением могут обрабатывать данные для создания трёхмерных изображений, которые необходимы для печати физических объектов. В свою очередь, трёхмерные принтеры способны создать модель любой сложности формы и геометрии. В статье выполнен обзор литературы, посвящённой трёхмерному цифровому моделированию анатомических структур пациентов для формовки по ним металлофиксаторов для накостного остеосинтеза. Поиск данных осуществлялся по базам Scopus, Web of Science, Pubmed, РИНЦ за период 2012–2022 гг. Подтверждена эффективность трёхмерной печати для предоперационного моделирования накостных пластин: последняя идеально соответствует уникальной анатомии пациента, поскольку шаблон для неё построен по материалам компьютерной томографии. Индивидуальные шаблоны могут быть полезны и удобны для хирурга, когда геометрия костей пациентов выходит за рамки стандартных, и когда ожидаются улучшенные результаты операции из-за лучшего соответствия имплантатов анатомическим потребностям пациентов.

Ключевые слова: 3D-печать, индивидуальные имплантаты, обработка изображений, пациент-специфический инструментарий, персонифицированная ортопедия, остеосинтез, блокирующая компрессионная пластина, фиксация моста, малоинвазивный остеосинтез с применением накостной пластины, открытая репозиция и внутренняя фиксация.

Для цитирования: Панкратов А.С., Ларцев Ю.В., Рубцов А.А., Огурцов Д.А., Ким Ю.Д., Шмельков А.В., Князев Н.А. Применение 3D-моделирования в персонифицированном подходе к накостному остеосинтезу (обзор литературы). *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ». Реабилитация, Врач и Здоровье*. 2023;13(1):161–172. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2023.1.ICTM.3>

APPLICATION OF 3D MODELING IN A PERSONALIZED APPROACH TO BONE OSTEOSYNTHESIS (A LITERATURE REVIEW)

A.S. Pankratov, Yu.V. Lartsev, A.A. Rubtsov, D.A. Ogurtsov, Yu.D. Kim, A.V. Shmel'kov, N.A. Knyazev

Samara State Medical University, Samara

Abstract. Three-dimensional printing opens up many opportunities for use in traumatology and orthopedics, because it takes into account personal characteristics of the patients. Modern methods of high-resolution medical imaging can process data to create three-dimensional images for printing physical objects. Today, three-dimensional printers are able to create a model of any complexity of shape and geometry. The article provides a review of the literature about three-dimensional digital modeling in shaping implants for osteosynthesis. Data search was carried out on the Scopus, Web of Science, Pubmed, RSCI databases for the period 2012–2022. The effectiveness of three-dimensional printing for preoperative modeling of bone plates has been confirmed: implants perfectly corresponds with the unique anatomy of the patient, since the template for it is based on the materials of computed tomography. Individual templates can be useful when the geometry of patients' bones goes beyond the standard, and when improved results of surgery are expected due to better matching of implants to the anatomical needs of patients.

Key words: 3D printing, custom implants, image processing, patient-specific instrument, patient-specific orthopedics, osteosynthesis, LCP, bridge fixation, MIPO, ORIF.

Cite as: Pankratov A.S., Lartsev Yu.V., Rubtsov A.A., Ogurtsov D.A., Kim Yu.D., Shmel'kov A.V., Knyazev N.A. Application of 3D modeling in a personalized approach to bone osteosynthesis (A literature review). *Bulletin of the Medical Institute "REAVIZ". Rehabilitation, Doctor and Health*. 2023;13(1):161–172. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2023.1.ICTM.3>



Травматология и ортопедия – раздел хирургии, который тесно связан с биомедицинской инженерией, применяемой при лечении от переломов до коррекции деформаций костей [1–3]. В этом взаимодействии помогают современные технологии медицинской визуализации, позволяющие провести детальный анализ опорно-двигательной системы человека [4]. Благодаря достижениям медицинской визуализации и компьютерного программирования виртуальные модели анатомических структур пациентов могут быть использованы для индивидуального планирования оперативных вмешательств на основе 3D-печати у конкретного пациента [5, 6].

3D-печать – это тип производственного процесса, при котором такие материалы, как пластик или металл, наносятся слоями для создания 3D-объекта из цифровой модели. Этот процесс отличается от традиционных методов производства тем, что он является аддитивным, а не вычитающим процессом, как, например, процесс создания скульптур [7, 8]. Гибкость технологии при изготовлении объектов на 3D-принтерах способствовала увеличению объема источников литературы за последнее десятилетие, посвященных использованию трёхмерной печати в хирургической практике, от предоперационного планирования до выбора дизайна импланта [9–14].

Но ещё пять лет назад не уделялось особого внимания применению этой технологии именно при работе с на костными пластинами для остеосинтеза ни в научных исследованиях, ни в коммерческой области. Это связано с несколькими факторами.

Во-первых, временной аспект – предполагается, что промежуток времени, предшествующий остеосинтезу, слишком короткий для проектирования и изготовления индивидуальных пластин или шаблонов моделирования на костных пластинах перед операцией [15–17]. Однако, учитывая развитие методов производства и программного обеспечения, временные требования сокращаются. Кроме того, во многих случаях операция должна быть отложена на 7–10 дней из-за повреждения мягких тканей [18–20].

Во-вторых, каковы выгоды пропорционально затратам и усилиям, включая, например, использование компьютерной томографии и 3D-принтера? В литературе сходятся во мнении, что более целе-

сообразным является не рутинное использование технологии, а применение в сложных случаях на костного остеосинтеза. Вот лишь несколько примеров, когда изготовление пластин индивидуально для пациента может принести пользу: при околоуставных переломах, в случаях, когда изменение формы обычных пластин для точного соответствия форме кости затруднено или требует много времени [21, 22]; при переломах, близких по локализации к ранее приобретенным деформациям, которые затрудняют позиционирование пластин [23]; в зонах остеопороза могут быть полезны специально разработанные пластины с определённым расположением и углом установки винтов [24, 25]; при выполнении минимально инвазивных операций [26, 27].

В-третьих, в последнее время выявляются недостатки и ограничения коммерческих прекопированных специализированных пластин [28, 29]. Иногда хирург может использовать репозицию на пластине, когда один костный фрагмент фиксируется к пластине, а остальные фрагменты выстраиваются относительно первого и пластины на нём [30]. В этом случае пластина либо точно контурируется по кости, либо используются предизогнутая [31, 32]. Однако геометрия импланта задаётся производителем и соответствует только типичной анатомии и не является специфичной для конкретного пациента. В литературе последних лет появляются научные работы по проксимальному отделу плечевой и дистальному отделу бедренной костей, которые демонстрируют, что прекопированные пластины не соответствуют анатомии отдельных пациентов в сагиттальной проекции [33]. В этом случае репозиция на пластине приведет к деформации. В проксимальном отделе плечевой кости отмечается латерализация и вальгусная деформация диафиза при использовании специализированных пластин, а в дистальном отделе бедренной кости – медиализация дистального сегмента [34].

Целью работы было оценить результаты, потенциальные преимущества и недостатки использования 3D-технологий для персонализированного подхода к на костному остеосинтезу.

Поиск данных осуществлялся по базам Scopus, Web of Science, Pubmed, ПИНЦ за период 2012–2022 гг. по ключевым словам: 3D printing; custom implants; image processing; patient-specific

instrument; patient-specific orthopedics. остеосинтез, LCP, мостовидная фиксация, MIPO, ORIF.

Перелом акромиального отростка лопатки

Переломы акромиального отростка лопатки встречаются редко: переломы лопатки составляют 1 % всех переломов, и из них только 8–10 % приходятся на акромион [35].

Обычно такой перелом является последствием высокоэнергетической травмы, сочетается с переломом гленоида, шейки и тела лопатки [36]. Оперативное лечение, например, накостный остеосинтез, показано при нарушении консолидации перелома, смещении отломков или при наличии сопутствующих повреждений плечевого пояса [37]. Доказана высокая вариабельность анатомической формы акромиона у разных индивидуумов [38]. При этом также не существует предизогнутых пластин для акромиона.

Belien H. с соавторами разработали персонализированный подход к остеосинтезу, основанный на использовании предизогнутой пластины, изначально изготовленной для дистального конца ключицы [39]. В начале, 3D-модель акромиона создавалась по данным КТ. 3.5-mm LCP пластина до операции моделировалась по форме 3D-модели как по шаблону и далее использовалась для остеосинтеза. Первые исследования выполнялись на кадаверном материале, где выявлена более состоятельная фиксация в сравнении с фиксацией канюлированными винтами и провололочным серкляжем [40]. Затем методика применялась у трёх пациентов с ложным суставом и у двух с переломом акромиального отростка лопатки.

Исследование показало, что метод дает хорошие результаты при лечении переломов акромиального отростка лопатки с давностью травмы не более трёх недель. Результаты лечения ложных суставов были более вариабельными. По мнению авторов, методика обладает преимуществом, так как другие способы фиксации акромиона иногда не обеспечивают стабильной фиксации. Например, при истончении стенки отростка, при котором введение канюлированного винта невозможно.

В этой ситуации можно использовать пластину для остеосинтеза. Но, как и накостный остеосинтез других сегментов конечностей, пластина может вызывать раздражение мягких тканей. Другой недостаток, по мнению авторов, – более вы-

сокая стоимость метода в сравнении со стандартным накостным остеосинтезом: стоимость возросла с 540 евро до 900. Разница не в пользу методики сохраняется даже при учёте использования собственного 3D-принтера. Подчеркивается, что необходимы дальнейшие исследования для получения точной оценки всех затрат, а не только затрат на расходные материалы.

Далее отмечается, что 3D-печать – медленный процесс, и толщина одного слоя модели составляет 0,15 мм, что не всегда достаточно. Кроме того, трёхмерная модель не может быть стерилизована, а значит, не применяется интраоперационно.

Всё же, в исследовании не требовался высокий уровень детализации, и предварительное моделирование пластины для остеосинтеза можно было выполнить предоперационно; таким образом, стерилизовать требовалось только пластину.

Перелом ключицы

Стандартным способом оперативного лечения переломов диафиза ключицы является открытая репозиция и фиксация пластиной (ORIF). При многооскольчатых переломах возможно применение миниинвазивного накостного остеосинтеза (MIPO), при котором пластина заводится под мягкие ткани через два небольших разреза, а зона перелома не обнажается, дабы сохранить васкуляризацию костных отломков [41]. Однако подобрать правильную пластину для каждого перелома ключицы непросто из-за индивидуальных особенностей размера и формы костей. Визуально невозможно проверить, плотно ли пластина прилегает к кости, если последняя вводится через минидоступы. Это ведёт к невозможности адекватной винтовой фиксации для оптимальной стабильности [42].

Kim H. с соавторами описали новую методику с использованием 3D-модели ключицы в качестве предоперационного инструмента для минимальноинвазивного накостного остеосинтеза смещённых оскольчатых переломов диафиза ключицы [43].

Пациентам выполнялась компьютерная томография (КТ) обеих верхних конечностей.

Строились компьютерные трёхмерные модели обеих ключиц в реальном размере. Используя метод зеркального отображения, неповреждённую ключицу распечатывали на 3D-принтере, что-

бы получить подходящую копию повреждённой ключицы до травмы.

Авторы заключают, что напечатанную на 3D-принтере модель неповреждённой ключицы можно использовать в качестве шаблона для выбора анатомически подготовленной фиксирующей пластины, которая наилучшим образом соответствует повреждённой кости. Пластину можно установить через мини-инвазивные доступы, не обнажая зону перелома. Способ использовался у семи пациентов с оскольчатыми переломами ключиц, где достигнута консолидация без осложнений. Со слов авторов, метод позволяет хирургу выбрать правильное расположение и длину винтов, также помогает тренировать хирургическую операцию на 3D-модели перед реальной операцией. 3D-модели также могут быть использованы для обучения ординаторов и объяснения предстоящей операции пациентам.

Проксимальные переломы плечевой кости

Несмотря на то, что результаты стандартной техники накостного остеосинтеза при переломах проксимального отдела плечевой кости являются удовлетворительными, Wang Q. с соавторами обнаружили сложность в использовании специализированных пластин, таких как PHILOS, для индивидуального применения [44]. Даже если моделировать пластину по стандартным полимерным моделям плечевых костей Синбон (Synbone AG, Маланс, Швейцария) перед операцией, иногда необходимо скорректировать форму уже во время вмешательства, при этом увеличивается продолжительность операции, что особенно важно в случае пожилых пациентов.

Автор статьи заметил, что пожилые пациенты, у которых переломы, скорее всего, сочетаются с тяжёлым остеопорозом, имеют гораздо более короткую плечевую кость, чем стандартная кость Synbone. По мнению Wang Q., персонализированная 3D-печатная модель была бы полезна для моделирования подобранной пластины PHILOS перед операцией. Для подтверждения коллективом авторов выполнен ретроспективный анализ случаев пациентов, которым выполнялся остеосинтез плечевой кости при переломе проксимального отдела техникой MIPO длинными спиральными пластинами PHILOS в период с февраля 2012 по февраль 2015 года из базы данных травматологи-

ческого центра Шанхая. В группе сравнения 21 пациенту выполнено двустороннее КТ плечевых костей. Используя медицинское программное обеспечение для обработки 3D-изображений (Mimics 16.0, Materialise, Belgium), получено зеркальное изображение интактной плечевой кости. На 3D-принтере по этому изображению создан шаблон плечевой кости из с полимерного материала. Затем контур длинной PHILOS пластины был изменён в соответствии с формой шаблона, далее выполнялся малоинвазивный остеосинтез. В группе контроля для 25 пациентов моделирование пластины выполнялось по стандартным моделям костей от Synbone.

В результате, не было выявлено никаких существенных различий между двумя группами в отношении времени сращения переломов по шкалам Constant-Murley score и Mayo Elbow Performance Score (MEPS). Длительность оперативного вмешательства в группе сравнения было значительно короче, чем в контрольной (42,62 мин и 60,36 мин соответственно), интраоперационная кровопотеря тоже была меньше (105,19 мл против 120,80 мл).

Таким образом, основными результатом этого исследования было снижение продолжительности операции и кровопотери за счёт использования 3D-печатного шаблона для предварительной обработки пластин перед операцией. Этот результат согласуется с гипотезой авторов статьи и может быть объяснён тем фактом, что плечевые кости пожилых пациентов короче стандартной плечевой кости и требуют от хирургов коррекции пластин во время операции. Поскольку шаблон, напечатанный на 3D-принтере, представлял фактический размер кости, пластины, предварительно очерченные по ним, всегда были пригодны для фиксации переломов. При применении техники MIPO выявлена только разница в кровопотере между двумя группами – 15 мл.

Внутрисуставные переломы нижней трети плечевой кости

Дистальные переломы плечевой кости представляют собой сложные для лечения травмы, частота которых, по некоторым оценкам, составляет 5,7 на 100 000 человек в год у взрослых, 0,5–7 % всех переломов костей человека, из них 1/3 – внутрисуставные межмыщелковые [45]. И хотя ча-

стота не слишком велика, такие переломы представляют собой проблему из-за сложной анатомии области локтевого сустава. Остеосинтез двумя параллельными пластинами, по данным литературы, показывает лучшие результаты.

Так как суставная поверхность часто повреждается при межмышечковых переломах плечевой кости, точная репозиция и стабильная фиксация её необходимы для удовлетворительного функционального восстановления локтевого сустава, особенно при оскольчатых переломах типа C3 [46].

Shuang F. с соавторами использовали в основе дизайн исследования Wang Q. и тот же способ изготовления шаблонов для пластин [47]. Тринадцать пациентов с дистальными межмышечковыми переломами плечевой кости были отобраны для проведения операции с использованием обычных пластин (контрольная группа, 7 пациентов) и пластин, отмоделированных по шаблону перед операцией (группа сравнения, 6 пациентов).

Как описывается и в предыдущей статье, по результатам исследования, время операции было значительно короче в группе сравнения, чем в контрольной (70,6 мин против 92,3 мин). Время сращения перелома, соотношение отличных, хороших, удовлетворительных результатов функции локтевого сустава было одинаковым в обеих группах.

Автор от себя отмечает, что в контрольной группе в процессе накостного остеосинтеза было технически сложнее сопоставить отломки, выполнить репозицию, отсюда затраты времени увеличивались. Пластина часто не соответствовала форме кости, была необходимость несколько раз моделировать её или срезать. К тому же, сложнее было контролировать направление и длину винтов. Таких проблем не наблюдалось во второй группе. Компьютерная навигация также может помочь повысить хирургическую точность, но её применение ограничено сложностью операции и связанными с этим высокими затратами на оборудование. Напротив, технология 3D-печати удобна, практична и сравнительно более дешёвая. Отмечены и некоторые ограничения в использовании предизогнутых пластин для остеосинтеза. Главным образом, они требуют времени на подготовку и печать, поэтому применять в экстренной хирургии их сложнее. Кроме того, у пациентов с тяжёлыми оскольчатыми переломами современная технология не позволяет дифференцировать

мельчайшие фрагменты. Также технология 3D-печати, используемая в исследовании, основана на КТ-изображениях, на которых отсутствует информация о прилегающих мягких тканях и сосудисто-нервных пучках.

Переломы вертлужной впадины и таза

Переломы вертлужной впадины – одни из наиболее сложных в хирургическом лечении по причине сложной трёхмерной анатомии, морфологических различий у отдельных индивидуумов, ограниченного хирургического доступа к месту перелома [48].

Принцип лечения этих переломов заключается в достижении анатомической редукции, ORIF остаётся стандартом лечения подобных переломов [49]. Двухмерные рентгенограммы таза и, даже, трёхмерные реконструкции на КТ предоставляют только ограниченное представление о необходимой форме пластины для остеосинтеза. А из-за вариативности анатомии таза у людей и разнообразных типов перелома вертлужной впадины трудно создать универсальную пластину, подходящую каждому пациенту [50].

Maini L. провёл исследование, в котором использовалось 3D-моделирование для подготовки пластин [51]. Были включены пациенты с переломами вертлужной впадины со смещением более 3 мм. Десяти пациентам, включённым в группу сравнения, выполнена КТ тазобедренных суставов, созданы трёхмерные модели повреждённых тазовых костей. Методом 3D-печати создана полиамидная модель по данным КТ. На этой модели выполнена репозиция отломков, контурирована пластина, затем выполнен остеосинтез. В контрольной группе выполнялся классический остеосинтез с контурированием пластины по кости интраоперационно.

Интраоперационная кровопотеря в основной группе была меньше, чем в контрольной (620 мл против 720 мл), что не является значимой разницей. Она, прежде всего, связана с уменьшением времени вмешательства (120 мин в основной и 132 мин в контрольной). Примечательно, что время для моделирования пластины интраоперационно во второй группе составило, в среднем, 9 минут.

Ранее исследования продемонстрировали, что шанс посттравматического артроза минимален в случаях наличия смещения отломков менее

1 мм. И, если даже изменения в суставе возникают на фоне идеальной репозиции, прослеживается тенденция в их более позднем появлении и более медленной прогрессии [52].

Maini L. получил в результате анатомичную репозицию у четырёх пациентов в группе сравнения, и только у одного – в контрольной группе. Только два пациента основной группы имели плохую репозицию, и четыре пациента – в контрольной. Для такого сравнения пациентам была выполнена контрольная КТ в раннем послеоперационном периоде: максимальное расстояние между отломками составило 4,75 мм в основной и 7,60 мм в контрольной группе, что, по заключению автора, является статистически значимым доказательством эффективности предложенного предоперационного моделирования пластин при дополнительных затратах для изготовления 3D-модели около 15–20 долларов США.

Wu C. с соавторами [53] включил в исследование 28 человек с нестабильными переломами таза, которые были разделены на группу контроля, где 18 пациентам проведён накостный остеосинтез переднего или заднего полукольца с интраоперационным моделированием пластины, и группу сравнения, в которой 10 пациентам применена технология 3D-печати для создания моделей таза и формовки по ним стальных пластин для подкожного проведения. Дополнительно распечатан навигационный шаблон для проведения винта с целью фиксации крестцово-подвздошного сочленения.

В итоге, интраоперационное время и кровопотеря, лучевая нагрузка, длина разреза были меньшими в группе сравнения, при этом не было значимых отличий в сроках начала нагрузки на оперированную конечность, во времени сращения перелома. В отличие от Maini L., автор этой статьи не получил значительных преимуществ в качестве репозиции, однако для послеоперационного контроля использовалась не КТ, а рентгенография.

Перелом плато большеберцовой кости

В настоящее время результаты внутренней фиксации осложнённых переломов плато большеберцовой кости не всегда удовлетворительны и разнятся от статьи к статье [54–56]. Вне сомнений, в предоперационном планировании при таких травмах необходим правильный выбор импланта.

Однако не все имеющиеся на рынке специализированные мышечковые пластины соответствуют кости, возможны несовпадения конфигурации фиксатора и геометрии поверхности мышечков, что вызывает отклонение блокируемых винтов от заданного направления в кости [57].

Huajun H. поставил в своей работе цель – контролировать направление проведения винтов на пластине при остеосинтезе плато большеберцовой кости [58].

Для участия в исследовании отобраны 6 пациентов с переломами типа Schatzker V и VI. Выполнена КТ большеберцовой кости с переломом, сформирована 3D-модель отломков и выполнена их виртуальная репозиция в программе Mimics 14.0. Далее отобраны 180 пластин различных типов для переломов плато, при помощи 3D-сканера получены 3D-модели, таким образом создана своего рода библиотека моделей пластин.

Полученные модели кости и пластин последовательно совмещали с целью поиска фиксатора, максимально точно анатомически соответствующего поверхности кортикального слоя. Траектории винтов при этом должны давать возможность фиксировать основные фрагменты перелома без выхода за границу субхондральной кости. Как только такая пластина определена, отверстия в её модели заменяются на цилиндры с отверстием, равному диаметру спицы. Такая модель распечатывается и стерилизуется, затем используется интраоперационно, где через цилиндры проводятся спицы с правильным направлением для проведения по ним винтов на пластине.

В послеоперационном периоде сравнили длину, точку входа и направление винтов на пластине между виртуальным планом и реальным хирургическим результатом.

Исследование показало минимальные отклонения между запланированными параметрами винтов и итоговым расположением (длина не более 15 мм, точка входа не более 6 мм, отклонение не более 14 мм). Huajun H. связывает такие отклонения с неидеальной мануальной репозицией перелома и влиянием мягких тканей. В связи с этим автор отмечает ограниченность методики для сложных многооскольчатых переломов, где выполнить репозицию отломков в соответствии с предоперационным планом практически невозможно.

Перелом пяточной кости

Расширенный латеральный доступ был наиболее часто применяемым для накостного остеосинтеза пяточной кости при её внутрисуставных переломах. И хотя он обеспечивает хорошую визуализацию перелома, большой разрез ведет к осложнениям со стороны мягких тканей, таким как некроз кожного лоскута, инфекция послеоперационной раны [59]. В целях устранения проблемы были внедрены мини-инвазивные доступы – через синус тарана, латеральный подтаранный. Но и новые доступы имеют свои недостатки: невозможно использовать такие же большие пластины, как и при расширенных доступах [60]. Существуют литературные данные о фиксации переломов пяточной кости только винтами, всё же они не обеспечивают стабильность при многооскольчатых переломах. Используя пластины с миниинвазивным доступом, пяточная кость обнажается лишь частично, отсюда ещё одной сложностью является контурирование пластины по кости [61].

Chung KJ. в своей статье для решения вопроса предлагает использовать реальных размеров трёхмерную модель пяточной кости как пред- и интраоперационный инструмент МПО при её переломах [62]. Для этого, по аналогии с вышеуказанными работами, выполняется создание зеркальной модели здоровой пяточной кости по данным КТ, по которой моделируется пластина до операции, а затем вводится через малоинвазивный доступ без дополнительного изгибания. Автор демонстрирует методику на одном пациенте с получением отличных результатов.

Chung KJ. указывает: одним из недостатков 3D-технологий для предоперационного планирования всё ещё остаётся увеличение затрат времени перед операцией. Всё же, по современным рекомендациям необходимо отсрочить оперативное вмешательство от 3 до 5 дней для уменьшения отёка мягких тканей в области перелома; подобный подход даёт достаточно времени для предоперационного планирования.

Результаты и обсуждение

В приведённых выше исследованиях демонстрируется предоперационное моделирование пластин по 3D-шаблонам при переломах разных локализаций с последующим накостным остеосинтезом.

Основными воспроизводимыми результатами были уменьшение продолжительности операции и интраоперационной кровопотери [63–66]. Отмечается удобство использования метода – технически проще сопоставить отломки, выполнить репозицию на пластине, отсюда затраты времени уменьшаются. Пластина соответствовала форме кости, отсутствовала необходимость несколько раз моделировать её или срезать. К тому же проще контролировать направление и длину винтов, особенно во время репозиции при малоинвазивном остеосинтезе, когда отмоделировать пластину по зоне перелома невозможно [67, 68].

Только в одном исследовании выполнялась контрольная КТ в раннем послеоперационном периоде, где выявлена более анатомичная репозиция в случаях применения метода. В остальных же источниках литературы выполнялась контрольная рентгенография, и статистически значимых различий в качестве репозиции не найдено.

Недостатки технологии также были отмечены в литературе. Объём времени на производство 3D-шаблонов в большой мере влияет на экономическую эффективность использования модели и снижает её пользу в случаях, требующих срочного вмешательства [69]. Весь процесс от выполнения КТ и до стерилизации готового импланта может занимать до двух суток [70]. При этом уже появляется программное обеспечение для ускорения шагов обработки КТ, которое позволяет пользователям легко выполнять сегментацию и 3D-реконструкцию, рабочие станции радиологов теперь имеют возможность конвертировать файлы DICOM в файлы STL, сокращая время, необходимое для создания реальных моделей из виртуальных [71, 72]. Кроме того, увеличивая время предоперационной подготовки, мы уменьшаем длительность операции.

Masario A. в своей статье выявил, что в денежном выражении, например, 10 минут, сэкономленных в операционной, потенциально могут иметь ту же ценность, что и 1 час работы над дизайном объекта или его производством [73]. В статье стоимость рабочего времени интраоперационно оценивалась в 16 евро в минуту, а стоимость анатомической 3D-модели – в диапазоне от 200 до 250 евро. Использование модели, по оценкам автора, позволило сэкономить, в среднем, 25,2 минуты на процедуру, т.е. 403 евро; в этом случае сэкономленное время, вероятно, компен-

сировало стоимость 3D-модели. Следует так же учитывать другие преимущества сокращения времени операции, включая сокращение длительности анестезии, что, как ожидается, в целом уменьшит потребность в анальгетиках, снизит риск инфекции послеоперационной раны, и, таким образом, исключит потребность в применении антибактериальной терапии.

Стоимость является самым важным фактором, определяющим возможность внедрения 3D-моделирования в клиническую практику. 3D-принтер с высоким разрешением стоит десятки тысяч долларов, а ЛПУ не производят объём 3D-моделей, необходимый для оправдания затрат на собственный принтер [74].

Вместо этого альтернативой являются сторонние компании, специализирующиеся на производстве 3D-печатных объектов для медицинского использования. Потенциальные недостатки аутсорсинга включают более высокую стоимость модели, проблемы с конфиденциальностью пациентов из-за передачи файлов за пределы больницы и более длительное время выполнения заказа из-за доставки [75].

Недостатком также является ограничение стерилизации полимерных моделей, которые не обладают сопротивляемостью к высоким температурам, а их пористая структура может способствовать тяжело устранимой микробной адгезии внутри модели.

Заключение

Появление технологии обработки изображений и 3D-печати открывает множество возможностей для применения в травматологии и ортопедии с учетом особенностей пациента. Современные способы медицинской визуализации с высоким разрешением могут обрабатывать данные для создания 3D-изображений, которые необходимы для печати физических объектов. В свою очередь, 3D-принтеры способны создать модель любой сложности формы и геометрии. В литературе подтверждается эффективность 3D-печати для предоперационного моделирования наkostных пластин: последняя идеально соответствует уникальной анатомии пациента, поскольку шаблон для неё построен по материалам компьютерной томографии.

Индивидуальные шаблоны могут быть полезны и удобны для хирурга, когда геометрия костей пациентов выходит за рамки стандартных, и когда ожидаются улучшенные результаты операции из-за лучшего соответствия имплантатов анатомическим потребностям пациентов.

В целом, хотя клинические данные в настоящее время ограничены, интеграция технологии 3D-печати в хирургическую практику является очень многообещающей, поскольку может сделать имплантаты более персонифицированными для каждого пациента.

Литература/References

- 1 Lal H, Patralekh MK. 3D printing and its applications in orthopaedic trauma: A technological marvel. *J Clin Orthop Trauma*. 2018 Jul-Sep;9(3):260–268. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2018.07.022>. Epub 2018 Aug 3. PMID: 30202159; PMCID: PMC6128305.
- 2 Chang D, Tummala S, Sotero D, Tong E, Mustafa L, Mustafa M, Browne WF, Winokur RS. Three-Dimensional Printing for Procedure Rehearsal/Simulation/Planning in Interventional Radiology. *Tech Vasc Interv Radiol*. 2019 Mar;22(1):14–20. <https://doi.org/10.1053/j.tvir.2018.10.004>. Epub 2018 Nov 2. PMID: 30765070.
- 3 Langridge B, Momin S, Coumbe B, Woin E, Griffin M, Butler P. Systematic Review of the Use of 3-Dimensional Printing in Surgical Teaching and Assessment. *J Surg Educ*. 2018 Jan-Feb;75(1):209–221. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2017.06.033>. Epub 2017 Jul 17. PMID: 28729190.
- 4 Boudissa M, Courvoisier A, Chabanas M, Tonetti J. Computer assisted surgery in preoperative planning of acetabular fracture surgery: state of the art. *Expert Rev Med Devices*. 2018 Jan;15(1):81–89. <https://doi.org/10.1080/17434440.2017.1413347>. Epub 2017 Dec 10. PMID: 29206497.
- 5 Gadia A, Shah K, Nene A. Emergence of Three-Dimensional Printing Technology and Its Utility in Spine Surgery. *Asian Spine J*. 2018 Apr;12(2):365–371. <https://doi.org/10.4184/asj.2018.12.2.365>. Epub 2018 Apr 16. PMID: 29713420; PMCID: PMC5913030.
- 6 Garg B, Gupta M, Singh M, Kalyanasundaram D. Outcome and safety analysis of 3D-printed patient-specific pedicle screw jigs for complex spinal deformities: a comparative study. *Spine J*. 2019 Jan;19(1):56–64. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2018.05.001>. Epub 2018 May 3. PMID: 29730456.
- 7 Trauner KB. The Emerging Role of 3D Printing in Arthroplasty and Orthopedics. *J Arthroplasty*. 2018 Aug;33(8):2352–2354. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2018.02.033>. Epub 2018 Feb 16. PMID: 29572035.
- 8 Mulford JS, Babazadeh S, Mackay N. Three-dimensional printing in orthopaedic surgery: review of current and future applications. *ANZ J Surg*. 2016 Sep;86(9):648–53. <https://doi.org/10.1111/ans.13533>. Epub 2016 Apr 12. PMID: 27071485.
- 9 Wong KC. 3D-printed patient-specific applications in orthopedics. *Orthop Res Rev*. 2016 Oct 14;8:57–66. <https://doi.org/10.2147/ORR.S99614>. PMID: 30774470; PMCID: PMC6209352.

- 10 Willemsen K, Ketel MHM, Zijlstra F, Florkow MC, Kuiper RJA, van der Wal BCH, Weinans H, Pourn B, Beekman FJ, Seevinck PR, Sakkars RJB. 3D-printed saw guides for lower arm osteotomy, a comparison between a synthetic CT and CT-based workflow. *3D Print Med*. 2021 Apr 29;7(1):13. <https://doi.org/10.1186/s41205-021-00103-x>. Erratum in: *3D Print Med*. 2021 Nov 17;7(1):37. PMID: 33914209; PMCID: PMC8082893.
- 11 Caiti G, Dobbe JGG, Strijkers GJ, Strackee SD, Streekstra GJ. Positioning error of custom 3D-printed surgical guides for the radius: influence of fitting location and guide design. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2018 Apr;13(4):507–518. <https://doi.org/10.1007/s11548-017-1682-6>. Epub 2017 Nov 6. PMID: 29110185; PMCID: PMC5880872.
- 12 Roner S, Carrillo F, Vlachopoulos L, Schweizer A, Nagy L, Fuernstahl P. Improving accuracy of opening-wedge osteotomies of distal radius using a patient-specific ramp-guide technique. *BMC Musculoskelet Disord*. 2018 Oct 15;19(1):374. <https://doi.org/10.1186/s12891-018-2279-0>. Erratum in: *BMC Musculoskelet Disord*. 2018 Nov 19;19(1):403. PMID: 30322393; PMCID: PMC6190568.
- 13 Roner S, Vlachopoulos L, Nagy L, Schweizer A, Fuernstahl P. Accuracy and Early Clinical Outcome of 3-Dimensional Planned and Guided Single-Cut Osteotomies of Malunited Forearm Bones. *J Hand Surg Am*. 2017 Dec;42(12):1031.e1-1031.e8. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2017.07.002>. Epub 2017 Sep 6. PMID: 28888571.
- 14 Keller M, Guebeli A, Thieringer F, Honigmann P. Overview of In-Hospital 3D Printing and Practical Applications in Hand Surgery. *Biomed Res Int*. 2021 Mar 26;2021:4650245. <https://doi.org/10.1155/2021/4650245>. PMID: 33855068; PMCID: PMC8019389.
- 15 García RI, Jauregui I, Del Amo C, Gandiaga A, Rodríguez O, Margallo L, Voces R, Martín N, Gallego I, Minguez R, Eguiraun H. Implementation of an In-House 3D Manufacturing Unit in a Public Hospital's Radiology Department. *Healthcare (Basel)*. 2022 Sep 16;10(9):1791. <https://doi.org/10.3390/healthcare10091791>. PMID: 36141403; PMCID: PMC9498605.
- 16 Li C, Cheung TF, Fan VC, Sin KM, Wong CW, Leung GK. Applications of Three-Dimensional Printing in Surgery. *Surg Innov*. 2017 Feb;24(1):82–88. <https://doi.org/10.1177/1553350616681889>. Epub 2016 Dec 29. PMID: 27913755.
- 17 Hecker A, Eberlein SC, Klenke FM. 3D printed fracture reduction guides planned and printed at the point of care show high accuracy – a porcine feasibility study. *J Exp Orthop*. 2022 Sep 27;9(1):99. <https://doi.org/10.1186/s40634-022-00535-2>. PMID: 36166163; PMCID: PMC9515260.
- 18 Ye Z, Zhao S, Zeng C, Luo Z, Yuan S, Li R. Study on the relationship between the timing of conversion from external fixation to internal fixation and infection in the treatment of open fractures of extremities. *J Orthop Surg Res*. 2021 Nov 7;16(1):662. <https://doi.org/10.1186/s13018-021-02814-7>. PMID: 34743751; PMCID: PMC8573926.
- 19 Bear J, Rollick N, Helfet D. Evolution in Management of Tibial Pilon Fractures. *Curr Rev Musculoskelet Med*. 2018 Dec;11(4):537–545. <https://doi.org/10.1007/s12178-018-9519-7>. PMID: 30343399; PMCID: PMC6220009.
- 20 Song K, Zhu B, Jiang Q, Xiong J, Shi H. The radiographic soft tissue thickness is associated with wound complications after open reduction and internal fixation of patella fractures. *BMC Musculoskelet Disord*. 2022 Jun 6;23(1):539. <https://doi.org/10.1186/s12891-022-05498-0>. PMID: 35668370; PMCID: PMC9169402.
- 21 Phen HM, Schenker ML. Minimizing Posttraumatic Osteoarthritis After High-Energy Intra-Articular Fracture. *Orthop Clin North Am*. 2019 Oct;50(4):433–443. <https://doi.org/10.1016/j.ocl.2019.05.002>. Epub 2019 Jul 12. PMID: 31466660.
- 22 Borrelli J Jr, Olson SA, Godbout C, Schemitsch EH, Stannard JP, Giannoudis PV. Understanding Articular Cartilage Injury and Potential Treatments. *J Orthop Trauma*. 2019 Jun;33 Suppl 6:S6–S12. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000001472>. PMID: 31083142.
- 23 Sagade B, Jagani N, Chaudhary I, Chaudhary M. Congenital Posteromedial Bowing of Tibia: Comparison of Early and Late Lengthening. *J Pediatr Orthop*. 2021 Oct 1;41(9):e816–e822. <https://doi.org/10.1097/BPO.0000000000001935>. PMID: 34387229.
- 24 Giordano V, Belangero WD, Sá BA, Rivas D, Souto D, Portnoi E, Mariolani JR, Koch HA. Plate-screw and screw-washer stability in a Schatzker type-I lateral tibial plateau fracture: a comparative biomechanical study. *Rev Col Bras Cir*. 2020 Jun 8;47:e20202546. English, Portuguese. <https://doi.org/10.1590/0100-6991e-20202546>. PMID: 32520134.
- 25 Cift H, Cetik O, Kalaycioglu B, Dirikoglu MH, Ozkan K, Eksioglu F. Biomechanical comparison of plate-screw and screw fixation in medial tibial plateau fractures (Schatzker 4). A model study. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2010 May;96(3):263–7. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2009.11.016>. Epub 2010 Apr 13. PMID: 20488145.
- 26 Beeres FJ, Diwersi N, Houwert MR, Link BC, Heng M, Knoke M, Groenwold RH, Frima H, Babst R, Jm van de Wall B. ORIF versus MIPO for humeral shaft fractures: a meta-analysis and systematic review of randomized clinical trials and observational studies. *Injury*. 2021 Apr;52(4):653–663. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2020.11.016>. Epub 2020 Nov 6. PMID: 33223254.
- 27 Marazzi C, Wittauer M, Hirschmann MT, Testa EA. Minimally invasive plate osteosynthesis (MIPO) versus open reduction and internal fixation (ORIF) in the treatment of distal fibula Danis-Weber types B and C fractures. *J Orthop Surg Res*. 2020 Oct 22;15(1):491. <https://doi.org/10.1186/s13018-020-02018-5>. PMID: 33092616; PMCID: PMC7583231.
- 28 Kwak JY, Park HB, Jung GH. Accurate application of a precontoured-locking plate for proximal humeral fractures in Asians: a cadaveric study. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2016 Oct;136(10):1387–93. <https://doi.org/10.1007/s00402-016-2538-1>. Epub 2016 Aug 4. PMID: 27492633.
- 29 Dang KH, Ornell SS, Reyes G, Hussey M, Dutta AK. A new risk to the axillary nerve during percutaneous proximal humeral plate fixation using the Synthes PHILOS aiming system. *J Shoulder Elbow Surg*. 2019 Sep;28(9):1795–1800. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2019.01.019>. Epub 2019 Apr 25. PMID: 31031168.
- 30 Beeres FJP, Quaile OM, Link BC, Babst R. Repositionstechniken bei minimal-invasiver Stabilisierung proximaler Humerusfrakturen [Reduction techniques for minimally invasive stabilization of proximal humeral fractures]. *Oper Orthop Traumatol*. 2019 Feb;31(1):63–80. German. <https://doi.org/10.1007/s00064-018-0586-0>. Epub 2019 Jan 25. PMID: 30683977.
- 31 Wang X, Tang X, Feng J, Zou Y, Zheng X. [Application of "door-shaft method" in limited open reduction and internal fixation with locking plate for two- and three-part fractures of the proximal humerus]. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi*. 2021 Jul 15;35(7):818–822. Chinese. <https://doi.org/10.7507/1002-1892.202103173>. PMID: 34308587; PMCID: PMC8311200.

- 32 Spies CK, Langer M, Hohendorff B, Müller LP, Oppermann J, Unglaub F. Offene Reposition und Schrauben-/Plattenosteosynthese von Mittelhandfrakturen [Open reduction and screw/plate osteosynthesis of metacarpal fractures]. *Oper Orthop Traumatol*. 2019 Oct;31(5):422–432. German. <https://doi.org/10.1007/s00064-019-00625-y>. Epub 2019 Sep 5. PMID: 31486853.
- 33 Ravindra A, Roebke A, Goyal KS. Cadaveric analysis of proximal humerus locking plate fit: Contour mismatch may lead to malreduction. *J Orthop Trauma*. 2017;31:663–667.
- 34 Bishop JA, Campbell ST, Graves ML, Gardner MJ. Contouring Plates in Fracture Surgery: Indications and Pitfalls. *J Am Acad Orthop Surg*. 2020 Jul 15;28(14):585–595. <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-19-00462>. PMID: 32692093.
- 35 Tuček M, Chochola A, Klika D, Bartoníček J. Epidemiology of scapular fractures. *Acta Orthop Belg*. 2017 Mar;83(1):8–15. PMID: 29322888.
- 36 Bhaduri I, Thakur R, Kumar S, Rajak MK. Isolated Fracture of the Acromion Process: A Case Report. *Cureus*. 2021 Mar 22;13(3):e14032. <https://doi.org/10.7759/cureus.14032>. PMID: 33767940; PMCID: PMC7982874.
- 37 Kurahashi S, Takeda S, Mitsuya S, Makiyama K, Yamauchi KI. Plate fixation of acromion fracture using a mesh plate. *Trauma Case Rep*. 2021 Mar 18;33:100470. <https://doi.org/10.1016/j.tcr.2021.100470>. PMID: 33869719; PMCID: PMC8044685.
- 38 El-Din WA, Ali MH. A Morphometric Study of the Patterns and Variations of the Acromion and Glenoid Cavity of the Scapulae in Egyptian Population. *J Clin Diagn Res*. 2015 Aug;9(8):AC08–11. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2015/14362.6386>. Epub 2015 Aug 1. PMID: 26435934; PMCID: PMC4576525.
- 39 Belien H, Biesmans H, Steenwerckx A, Bijlens E, Dierickx C. Prebending of osteosynthesis plate using 3D printed models to treat symptomatic os acromiale and acromial fracture. *J Exp Orthop*. 2017 Oct 24;4(1):34. <https://doi.org/10.1186/s40634-017-0111-7>. PMID: 29067535; PMCID: PMC5655403.
- 40 Loomans L, Mannaerts J, Clerx S, Geuns A, Hens N, Dierickx C (2017) Pre-bending of osteosynthesis plate versus screw and cerclage fixation for os acromiale or acromion fracture: the 3D technique and mechanical testing. *Tech Shoulder Elb Surg* In press (TSES-17-13R1).
- 41 Mendes AF et al, Protocol of BRICS: Brazilian multicentric pragmatic randomised trial of surgical interventions for displaced diaphyseal clavicle fracture study: MIPO versus ORIF for the treatment of displaced midshaft clavicle fractures. *BMJ Open*. 2021 Oct 29;11(10):e052966. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2021-052966>. PMID: 34716165; PMCID: PMC8559127.
- 42 Kundangar RS, Mohanty SP, Bhat NS. Minimally invasive plate osteosynthesis (MIPO) in AO/OTA type B displaced clavicle fractures. *Musculoskelet Surg*. 2019 Aug;103(2):191–197. <https://doi.org/10.1007/s12306-018-0577-1>. Epub 2018 Dec 5. PMID: 30519988.
- 43 Kim HN, Liu XN, Noh KC. Use of a real-size 3D-printed model as a preoperative and intraoperative tool for minimally invasive plating of comminuted midshaft clavicle fractures. *J Orthop Surg Res*. 2015 Jun 10;10:91. <https://doi.org/10.1186/s13018-015-0233-5>. PMID: 26054648; PMCID: PMC4465325.
- 44 Wang Q, Hu J, Guan J, Chen Y, Wang L. Proximal third humeral shaft fractures fixed with long helical PHILOS plates in elderly patients: benefit of pre-contouring plates on a 3D-printed model—a retrospective study. *J Orthop Surg Res*. 2018 Aug 17;13(1):203. <https://doi.org/10.1186/s13018-018-0908-9>. PMID: 30119637; PMCID: PMC6098615.
- 45 Lauder A, Richard MJ. Management of distal humerus fractures. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2020 Jul;30(5):745–762. <https://doi.org/10.1007/s00590-020-02626-1>. Epub 2020 Jan 21. PMID: 31965305.
- 46 Plath JE, Förch S, Haufe T, Mayr EJ. Distal Humerus Fracture in the Elderly. *Z Orthop Unfall*. 2018 Feb;156(1):30–40. German. <https://doi.org/10.1055/s-0043-121893>. Epub 2018 Jan 11. PMID: 29325184.
- 47 Shuang F, Hu W, Shao Y, Li H, Zou H. Treatment of Intercondylar Humeral Fractures With 3D-Printed Osteosynthesis Plates. *Medicine (Baltimore)*. 2016 Jan;95(3):e2461. <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000002461>. PMID: 26817880; PMCID: PMC4998254.
- 48 Kelly J, Ladurner A, Rickman M. Surgical management of acetabular fractures – A contemporary literature review. *Injury*. 2020 Oct;51(10):2267–2277. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2020.06.016>. Epub 2020 Jun 24. PMID: 32646650.
- 49 Shah N, Gill IP, Hosahalli Kempanna VK, Iqbal MR. Management of acetabular fractures in elderly patients. *J Clin Orthop Trauma*. 2020 Nov-Dec;11(6):1061–1071. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2020.10.029>. Epub 2020 Oct 19. Erratum in: *J Clin Orthop Trauma*. 2021 Oct;21:101561. PMID: 33192010; PMCID: PMC7656530.
- 50 Perdue PW Jr, Tainter D, Toney C, Lee C. Evaluation and Management of Posterior Wall Acetabulum Fractures. *J Am Acad Orthop Surg*. 2021 Nov 1;29(21):e1057–e1067. <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-20-01301>. PMID: 34323866.
- 51 Maini L, Sharma A, Jha S, Sharma A, Tiwari A. Three-dimensional printing and patient-specific pre-contoured plate: future of acetabulum fracture fixation? *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2018 Apr;44(2):215–224. <https://doi.org/10.1007/s00068-016-0738-6>. Epub 2016 Oct 26. PMID: 27785534.
- 52 Mittweide PN, Gibbs CM, Ahn J, Bergin PF, Tarkin IS. Is Obesity Associated With an Increased Risk of Complications After Surgical Management of Acetabulum and Pelvis Fractures? A Systematic Review. *J Am Acad Orthop Surg Glob Res Rev*. 2021 Apr 19;5(4):e21.00058. <https://doi.org/10.5435/JAAOSGlobal-D-21-00058>. PMID: 33872226; PMCID: PMC8057757.
- 53 Wu C, Deng J, Tan L, Hu H, Yuan D. [Effectiveness analysis of three-dimensional printing assisted surgery for unstable pelvic fracture]. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi*. 2019 Apr 15;33(4):455–461. Chinese. <https://doi.org/10.7507/1002-1892.201806045>. PMID: 30983194; PMCID: PMC8337171.
- 54 Rudran B, Little C, Wiik A, Logishetty K. Tibial Plateau Fracture: Anatomy, Diagnosis and Management. *Br J Hosp Med (Lond)*. 2020 Oct 2;81(10):1–9. <https://doi.org/10.12968/hmed.2020.0339>. Epub 2020 Oct 30. PMID: 33135915.
- 55 Giordano V, do Amaral NP, Koch HA, E Albuquerque RP, de Souza FS, Dos Santos Neto JF. Outcome evaluation of staged treatment for bicondylar tibial plateau fractures. *Injury*. 2017 Oct;48 Suppl 4:S34–S40. [https://doi.org/10.1016/S0020-1383\(17\)30773-8](https://doi.org/10.1016/S0020-1383(17)30773-8). PMID: 29145966.
- 56 McGonagle L, Cordier T, Link BC, Rickman MS, Solomon LB. Tibia plateau fracture mapping and its influence on fracture fixation. *J Orthop Traumatol*. 2019 Feb 26;20(1):12. <https://doi.org/10.1186/s10195-019-0519-1>. PMID: 30806822; PMCID: PMC6391503.

- 57 Ramponi DR, McSwigan T. Tibial Plateau Fractures. *Adv Emerg Nurs J*. 2018 Jul/Sep;40(3):155-161. <https://doi.org/10.1097/TME.000000000000194>. PMID: 30059369.
- 58 Huang H, Hsieh MF, Zhang G, Ouyang H, Zeng C, Yan B, Xu J, Yang Y, Wu Z, Huang W. Improved accuracy of 3D-printed navigational template during complicated tibial plateau fracture surgery. *Australasian physical & engineering sciences in medicine*. 2015 Mar 1;38(1):109-17.
- 59 Rammelt S, Swords MP. Calcaneal Fractures-Which Approach for Which Fracture? *Orthop Clin North Am*. 2021 Oct;52(4):433-450. <https://doi.org/10.1016/j.ocl.2021.05.012>. Epub 2021 Jul 29. PMID: 34538353.
- 60 Nosewicz T, Knupp M, Barg A, Maas M, Bolliger L, Goslings JC, Hintermann B. Mini-open sinus tarsi approach with percutaneous screw fixation of displaced calcaneal fractures: a prospective computed tomography-based study. *Foot Ankle Int*. 2012 Nov;33(11):925-33. <https://doi.org/10.3113/FAI.2012.0925>. PMID: 23131437.
- 61 Feng Y, Shui X, Wang J, Cai L, Yu Y, Ying X, Kong J, Hong J. Comparison of percutaneous cannulated screw fixation and calcium sulfate cement grafting versus minimally invasive sinus tarsi approach and plate fixation for displaced intra-articular calcaneal fractures: a prospective randomized controlled trial. *BMC Musculoskelet Disord*. 2016 Jul 15;17:288. <https://doi.org/10.1186/s12891-016-1122-8>. PMID: 27422705; PMCID: PMC4946135.
- 62 Chung KJ, Hong DY, Kim YT, Yang I, Park YW, Kim HN. Preshaping plates for minimally invasive fixation of calcaneal fractures using a real-size 3D-printed model as a preoperative and intraoperative tool. *Foot Ankle Int*. 2014 Nov;35(11):1231-6. <https://doi.org/10.1177/1071100714544522>. Epub 2014 Jul 22. PMID: 25053782.
- 63 Takao M, Hamada H, Sakai T, Sugano N. Clinical Application of Navigation in the Surgical Treatment of a Pelvic Ring Injury and Acetabular Fracture. *Adv Exp Med Biol*. 2018;1093:289-305. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1396-7_22. PMID: 30306489.
- 64 Sánchez-Pérez C, Rodríguez-Lozano G, Rojo-Manaute J, Vaquero-Martín J, Chana-Rodríguez F. 3D surgical printing for preoperative planning of trabecular augments in acetabular fracture sequel. *Injury*. 2018 Sep;49 Suppl 2:S36-S43. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2018.07.014>. PMID: 30219146.
- 65 Chen K, Yang F, Yao S, Xiong Z, Sun T, Zhu F, Telemacque D, Drepaup D, Ren Z, Guo X. Application of computer-assisted virtual surgical procedures and three-dimensional printing of patient-specific pre-contoured plates in bicolumnar acetabular fracture fixation. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2019 Sep;105(5):877-884. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2019.05.011>. Epub 2019 Jul 9. PMID: 31300239.
- 66 Yu C, Yu W, Mao S, Zhang P, Zhang X, Zeng X, Han G. Traditional three-dimensional printing technology versus three-dimensional printing mirror model technology in the treatment of isolated acetabular fractures: a retrospective analysis. *J Int Med Res*. 2020 May;48(5):300060520924250. <https://doi.org/10.1177/0300060520924250>. PMID: 32466684; PMCID: PMC7263167.
- 67 Huang JH, Liao H, Tan XY, Xing WR, Zhou Q, Zheng YS, Cao HY, Zeng CJ. Surgical treatment for both-column acetabular fractures using pre-operative virtual simulation and three-dimensional printing techniques. *Chin Med J (Engl)*. 2020 Feb 20;133(4):395-401. <https://doi.org/10.1097/CM9.0000000000000649>. PMID: 31977558; PMCID: PMC7046251.
- 68 Hsu CL, Chou YC, Li YT, Chen JE, Hung CC, Wu CC, Shen HC, Yeh TT. Pre-operative virtual simulation and three-dimensional printing techniques for the surgical management of acetabular fractures. *Int Orthop*. 2019 Aug;43(8):1969-1976. <https://doi.org/10.1007/s00264-018-4111-8>. Epub 2018 Aug 20. PMID: 30128670.
- 69 Hung CC, Li YT, Chou YC, Chen JE, Wu CC, Shen HC, Yeh TT. Conventional plate fixation method versus pre-operative virtual simulation and three-dimensional printing-assisted contoured plate fixation method in the treatment of anterior pelvic ring fracture. *Int Orthop*. 2019 Feb;43(2):425-431. <https://doi.org/10.1007/s00264-018-3963-2>. Epub 2018 May 3. PMID: 29725736.
- 70 Papotto G, Testa G, Mobilia G, Perez S, Dimartino S, Giardina SMC, Sessa G, Pavone V. Use of 3D printing and pre-contouring plate in the surgical planning of acetabular fractures: A systematic review. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2022 Apr;108(2):103111. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2021.103111>. Epub 2021 Oct 11. PMID: 34648997.
- 71 Yammine K, Karbala J, Maalouf A, Daher J, Assi C. Clinical outcomes of the use of 3D printing models in fracture management: a meta-analysis of randomized studies. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2022 Oct;48(5):3479-3491. <https://doi.org/10.1007/s00068-021-01758-1>. Epub 2021 Aug 12. PMID: 34383092.
- 72 Tu DP, Yu YK, Liu Z, Zhang WK, Fan X, Xu C. Three-dimensional printing combined with open reduction and internal fixation versus open reduction and internal fixation in the treatment of acetabular fractures: A systematic review and meta-analysis. *Chin J Traumatol*. 2021 May;24(3):159-168. <https://doi.org/10.1016/j.cjtee.2021.02.007>. Epub 2021 Feb 27. PMID: 33678536; PMCID: PMC8173577.
- 73 Macario A. What does one minute of operating room time cost? *J Clin Anesth*. 2010 Jun;22(4):233-6. <https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2010.02.003>. PMID: 20522350.
- 74 Shi G, Liu W, Shen Y, Cai X. 3D printing-assisted extended lateral approach for displaced intra-articular calcaneal fractures: a systematic review and meta-analysis. *J Orthop Surg Res*. 2021 Nov 18;16(1):682. <https://doi.org/10.1186/s13018-021-02832-5>. PMID: 34794479; PMCID: PMC8600868.
- 75 Bouabdellah M, Bensalah M, Kamoun C, Bellil M, Kooli M, Hadhri K. Advantages of three-dimensional printing in the management of acetabular fracture fixed by the Kocher-Langenbeck approach: randomised controlled trial. *Int Orthop*. 2022 May;46(5):1155-1163. <https://doi.org/10.1007/s00264-022-05319-y>. Epub 2022 Feb 1. PMID: 35103815.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Competing interests. The authors declare no competing interests.

Финансирование. Исследование проводилось без спонсорской поддержки.

Funding. This research received no external funding.

Авторская справка**Панкратов
Александр
Сергеевич**

кандидат медицинских наук, доцент кафедры травматологии, ортопедии и экстремальной хирургии им. академика РАН А.Ф. Краснова, Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия
E-mail: pas76@mail.ru
ORCID 0000-0002-6031-4824
Вклад в статью 15 % – разработка концепции и дизайна, анализ и интерпретация данных; обоснование рукописи, проверка критически важного интеллектуального содержания, окончательное утверждение для публикации рукописи

**Ларцев Юрий
Васильевич**

доктор медицинских наук, профессор кафедры травматологии, ортопедии и экстремальной хирургии им. академика РАН А.Ф. Краснова, Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия
ORCID 0000-0003-4450-2486
Вклад в статью 15 % – разработка концепции и дизайна, анализ и интерпретация данных; обоснование рукописи, проверка критически важного интеллектуального содержания, окончательное утверждение для публикации рукописи

**Рубцов Артемий
Алексеевич**

аспирант кафедры травматологии, ортопедии и экстремальной хирургии им. академика РАН А.Ф. Краснова, Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия
E-mail: artemiy.rubtzov@mail.ru
ORCID 0000-0002-9004-7018
Вклад в статью 14 % – разработка концепции и дизайна, анализ и интерпретация данных; обоснование рукописи или проверка критически важного интеллектуального содержания, окончательное утверждение для публикации рукописи

**Огурцов Денис
Александрович**

кандидат медицинских наук, доцент кафедры травматологии, ортопедии и экстремальной хирургии им. академика РАН А.Ф. Краснова, Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия
E-mail: odat@mail.ru
ORCID 0000-0003-3830-2998
Вклад в статью 14 % – анализ и интерпретация данных; обоснование рукописи, окончательное утверждение для публикации рукописи

**Ким Юрий
Дмитриевич**

кандидат медицинских наук, ассистент кафедры травматологии, ортопедии и экстремальной хирургии им. академика РАН А.Ф. Краснова, Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия
E-mail: drkim@mail.ru
ORCID 0000-0002-9300-2704
Вклад в статью 14 % – разработка концепции и дизайна, анализ и интерпретация данных; проверка критически важного интеллектуального содержания, окончательное утверждение для публикации рукописи

**Шмельков Андрей
Владимирович**

кандидат медицинских наук, ассистент кафедры травматологии, ортопедии и экстремальной хирургии им. академика РАН А.Ф. Краснова, Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия
E-mail: phenicks-fire@mail.ru
ORCID 0000-0001-6900-0824
Вклад в статью 14 % – обоснование рукописи, проверка критически важного интеллектуального содержания, окончательное утверждение для публикации рукописи

**Князев Никита
Алексеевич**

ассистент кафедры травматологии, ортопедии и экстремальной хирургии им. академика РАН А.Ф. Краснова, Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия
E-mail: n.knyazev.bass@gmail.com
ORCID 0000-0003-1770-965X
Вклад в статью 14 % – обоснование рукописи, проверка критически важного интеллектуального содержания, окончательное утверждение для публикации рукописи