

DOI 10.25789/YMJ.2025.89.22

УДК 617.58:004.94

3.3. Юнусова, А.С. Саидов, М.А. Саидова, А.Р. Атаев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 3D-ПЕЧАТИ ДЛЯ ПРЕДОПЕРАЦИОННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И ИНДИВИДУАЛИЗАЦИИ ЛЕЧЕНИЯ В ТРАВМАТОЛОГИИ И ОРТОПЕДИИ: КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Обзор посвящен современным достижениям в использовании 3D-печати для создания моделей, имплантатов и инструментов, которые адаптируются под индивидуальные анатомические особенности пациента. Преимущества 3D-печати включают в себя повышение точности хирургических вмешательств и снижение операционных рисков за счет персонализированных решений. Вместе с тем обзор освещает ключевые препятствия на пути внедрения технологии в клиническую практику, такие как высокие затраты и необходимость стандартизации процессов. Несмотря на эти вызовы, 3D-печать обладает значительным потенциалом для трансформации медицинских подходов и методов обучения, что открывает перспективы создания более эффективных и персонализированных терапевтических методик в области ортопедии и травматологии.

Ключевые слова: ортопедическая хирургия, 3D-печать, травматология, имплантаты, 3D-моделирование, хирургические инструменты.

This review focuses on modern advances in the use of 3D printing to create models, implants, and instruments that adapt to the individual anatomical characteristics of the patient. The benefits of 3D printing include improving the accuracy of surgical procedures and reducing operational risks through personalized solutions. At the same time, the review highlights key obstacles to the introduction of technology into clinical practice, such as high costs and the need for standardization of processes. Despite these challenges, 3D printing has significant potential to transform medical approaches and teaching methods, which opens up prospects for creating more effective and personalized therapeutic techniques in the field of orthopedics and traumatology.

Keywords: orthopedic surgery, 3D printing, traumatology, implants, 3D modeling, surgical instruments.

Для цитирования: Юнусова 3.3., Саидов А.С., Саидова М.А., Атаев А.Р. Использование 3D-печати для предоперационного планирования и индивидуализации лечения в травматологии и ортопедии: концептуальная эволюция и перспективы развития. Якутский медицинский журнал. 2025; 89(1): 94-102. <https://doi.org/10.25789/YMJ.2025.89.22>

Введение. Трехмерная (3D) печать, также известная как аддитивное производство или быстрое прототипирование, существует уже несколько десятилетий и признана эффективным методом изготовления ортопедических инструментов и имплантатов [35, 53, 63]. В последние годы интерес к 3D-печати в области ортопедии вновь вырос, что связано с сокращением издержек, увеличением доступности 3D-принтеров, материалов для печати и программного обеспечения, а также с желанием предоставлять более персонализированное лечение паци-

ентам. Это развитие привело к появлению концепции «локальной печати», или «печати на месте оказания медицинской помощи» (PPC). Независимо от того, кто производит устройства, традиционные компании или PPC, преимущества 3D-печати очевидны [16, 31, 36, 46].

Данная технология позволяет разрабатывать инструкции и хирургические инструменты, адаптированные к особенностям каждой отдельной анатомической модели, что даёт возможность выполнять объемные и точные 3D-измерения [38]. Индивидуализированные инструменты помогают хирургам моделировать операции, точно измерять необходимые корректировки в остеотомии, планировать исправление переломов, рассчитывать объем требуемых аллотрансплантатов и применять эту технологию во многих других областях [25].

Цель данного обзора – представить подход к пониманию этой технологии и её ключевых принципов.

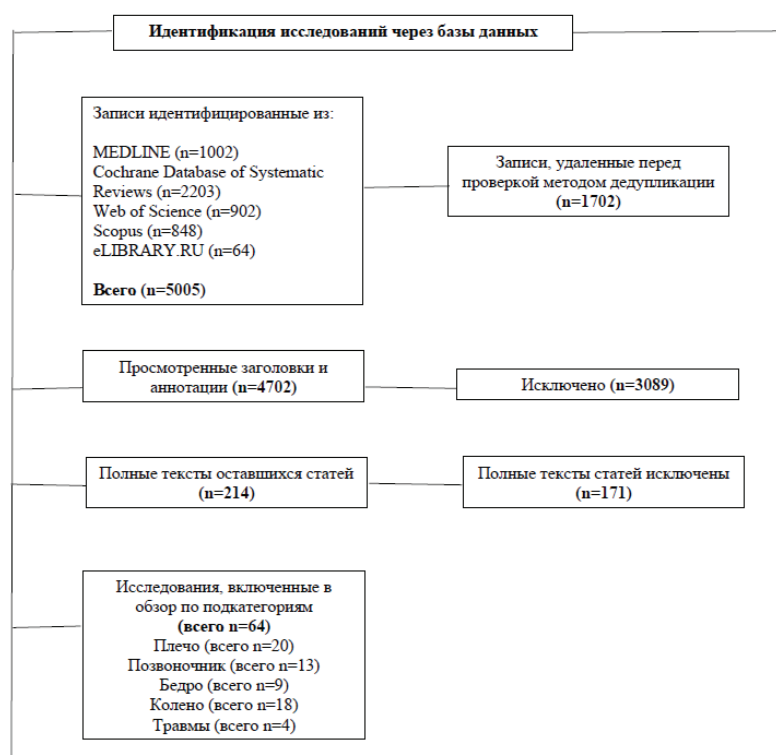
Материалы и методы. Был проведен поиск литературы в следующих базах данных: Web of Science, Scopus,

PubMed (MEDLINE), eLIBRARY.RU и Cochrane Database of Systematic Reviews. Для отбора соответствующих публикаций использовались такие ключевые слова, как: «3D-печать в ортопедической хирургии», «трехмерная печать и травматология», «аддитивное производство в ортопедии», «персонализированные имплантаты в травматологии», «3D-принтинг и хирургические инструменты», «внутренняя печать и медицинская помощь».

В результате поиска было найдено 5005 публикаций. После удаления 1702 дубликата процесс отбора продолжили с 3303 потенциально подходящими исследованиями. При проверке заголовков и аннотаций было исключено 3089 статей. Полные тексты оставшихся 214 статей были детально проанализированы, и в итоговый список вошли 64 работы. Блок-схема PRISMA представлена на рисунке.

В табл. 1 перечислены все демографические и технические данные. Среди 64 отобранных исследований были рассмотрены как рандомизированные контролируемые исследования, так и метаанализы, систематические обзо-

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный медицинский университет» МЗ РФ, 367005, г. Махачкала, пл. Ленина, 1: **ЮНУСОВА Зарина Замрутдиновна** – студентка, ORCID: 0009-0001-5863-5397, zarina.yunusova01@mail.ru, **САИДОВ Абдул Султанмагомедович** – студент, ORCID: 0009-0006-1062-8987, saidov23456.com@gmail.com, **САИДОВА Маликат Ахмедовна** – студентка, ORCID: 0009-0001-5441-8395, saidova.m02@icloud.com, **АТАЕВ Алевдин Рашитханович** – д.м.н., проф., зав кафедрой, drataev57@mail.ru.



Предпочтительные элементы представления отчетности для систематических обзоров и метаанализа (PRISMA)

ры. Особое внимание уделялось качеству методологии и применяемым в исследованиях подходам. Полученные результаты позволили сделать обоснованные выводы о влиянии изучаемых факторов, а также выделить области, требующие дальнейших исследований.

Историческая справка. Истоки трехмерной печати можно проследить до времен, когда зарождалось искусство скульптуры в каменном веке. Человечество, существуя в трехмерном мире, всегда стремилось воспроизводить эту реальность в разных материалах. В 1859 г. Франсуа Виллем во Франции создал первую технологию 3D-сканирования, назвав ее "фото-скульптурой". Фотографии, снятые с углом обзора в 360 градусов, использовались для создания силуэтов человека или объекта, которые затем, благодаря пантографу, переносились в нужном масштабе и служили основой для создания трехмерной скульптуры. В 1892 г. Джозеф Блантер запатентовал в США технологию создания трехмерных топографических карт, которая использовала метод послойного накопления, похожий на концепцию современных 3D-принтеров. Спустя почти сто лет, в Японии, Хидео Кодاما предложил идею создания 3D-прототипов с помощью инъекции фотополимеров, затвердевающих под

воздействием ультрафиолетовых лучей. Однако первым, кто создал настоящий 3D-принтер, был Чарльз Халл в 1984 г. в США, и его считают основоположником 3D-печати [61]. В 1988 г. Халл представил на рынке первый 3D-принтер, получивший название SLA-250 [33].

С 2007 г. начали оформлять патенты, и интерес к теме 3D-печати заметно возрос. Были разработаны доступные принтеры с открытым исходным кодом, которые могли самовоспроизводиться. Первое упоминание применения этой технологии в сфере здравоохранения появилось в начале XXI века [35, 44]. В период с 2009 по 2011 г. произошла смена акцентов в публикациях: от простой печати для предоперационного планирования к производству хирургических инструментов и даже имплантатов [63].

Применение 3D-печати в ортопедической хирургии и травматологии. Во всем мире хирурги-ортопеды,

Таблица 1

Демографическая и техническая информация по исследованиям, использующим 3D-печать в ортопедической хирургии и травматологии

Ссылка	Страна	Категория	Метод визуализации
Parratte et al. [31]	США	Позвоночник	СТ
Gauci et al. [46]	Франция	TSA	СТ
Wang et al. [16]	Китай	ТНА	СТ
Yamamura et al. [43]	Япония	ТКА	СТ
Ferretti et al. [55]	Италия	ТНА	СТ
Hendel et al. [24]	США	TSA	СТ
DeVloo et al. [58]	Бельгия	ТКА	MRT
Sariali et al. [50]	Франция	ТКА	СТ
Cui et al. [32]	Китай	Позвоночник	СТ
Roh et al. [38]	Южная Корея	ТКА	СТ
Dasari et al. [13]	США	TSA	СТ
Mohar et al. [47]	Словения	Позвоночник	СТ
Van Genechten et al. [36]	Бельгия	ТКА	СТ
Matsukawa et al. [41]	Япония	Позвоночник	СТ
Moya et al. [64]	Мексика	TSA	MRT
Zheng et al. [25]	Китай	ТКА	СТ
Zhang et al. [30]	Китай	Тазовая зона	СТ
Chen et al. [23]	Китай	Позвоночник	СТ
Cho et al. [15]	Южная Корея	Позвоночник	СТ
Zheng et al. [18]	Китай	Тазовая зона	MRT, СТ
Rosenzweig et al. [14]	Канада	TSA	СТ
Pehde et al. [29]	США	ТКА	СТ

Примечание. СТ - компьютерная томография; MRT - магнитно-резонансная томография; ТНА - тотальное эндопротезирование тазобедренного сустава; ТКА - тотальное эндопротезирование коленного сустава; TSA - тотальное эндопротезирование плечевого сустава

Таблица 2

Результаты применения 3D-печати в различных областях ортопедической хирургии и травматологии

Анатомическая область	Области применения 3D-печати
Проксимальный отдел плечевой кости	3D-модель, используемая для планирования [64]
Акромион	3D-модель, применяемая для корректировки формы пластины [25]
Ключица	3D-модель, предназначенная для планирования и подготовки пластин [61]
Дистальный отдел плечевой кости и локтя	Пластины для 3D-печати, 18 шаблонов и направляющих, а также 3D-модели [61]
Дистальная лучевая кость	Хирургическое планирование остеотомий с использованием 3D-моделирования [25]
Рука	Экспериментальное 3D-моделирование для планирования реконструкции большого пальца, включающее васкуляризованные костные лоскуты и ладьевидные пластины [64]
Таз	3D-модель, используемая для подготовки и планирования [61]
Дистальный отдел бедренной кости	3D-модель, используемая для подготовки и планирования [61]
Реконструкция ACL	Артроскопический инструмент для создания бедренного туннеля ACL, адаптированный под анатомические особенности пациента на основе данных МРТ [25]
Проксимальный отдел большеберцовой кости	3D-модель, используемая для подготовки и планирования [61]
Пилон большеберцовой кости и лодыжка	3D-модель, используемая для подготовки и планирования [61]
Лодыжка	Персонализированный навигационный шаблон для восстановления связок голеностопного сустава [64]

специалисты смежных областей и ученые активно применяют 3D-печать для создания моделей, инструментов, имплантатов, ортезов и протезов, адаптированных под каждого пациента. Также технологии 3D-биопечати используются для создания каркасов костей и хрящей, охватывая практически все аспекты ортопедической травматологии, от головы до ног (табл.2).

На основании представленной таблицы отметим, что использование 3D-моделей позволяет хирургам заранее визуализировать сложные анатомические структуры, такие как проксимальный отдел плечевой кости, акромион, таз, что способствует более точному и эффективному проведению операций. В частности, для дистального отдела плечевой кости и локтя печатные пластины, шаблоны и направляющие оптимизируют хирургический процесс, повышая его предсказуемость и уменьшая риск осложнений. Персонализированные навигационные шаблоны для восстановления связок голеностопного сустава улучшают результаты за счет учета индивидуальных анатомических особенностей пациента. Кроме того, технологии 3D-печати способствуют инновациям в реконструктивных подходах, как в случае с моделью руки и большим пальцем, что открывает новые возможности для восстановления функций сложных суставов и костных структур. В целом, применение 3D-печати в ортопедии способствует повышению качества медицинской помощи, снижению операционных рисков и улучшению реабилитации пациентов.

Основные преимущества и недостатки 3D-печати в ортопедической хирургии и травматологии. Ортопедия и травматология являются одними из медицинских областей, где 3D-планирование существенно повлияло на практику, особенно в лечении травм и в онкологической ортопедии. Анализ литературы в области ортопедии показывает заметное увеличение числа публикаций, посвященных данной теме [12, 20, 24, 25, 55]. Основное использование 3D-технологий связано с предоперационным планированием, а также с разработкой индивидуальных имплантатов и направляющих устройств. Среди наиболее часто используемых материалов для 3D-печати – титан, акрилонитрил-бутадиен-стирол (ABS) и полимолочная кислота (PLA).

В предоперационной подготовке 3D-печать открывает новые возможности повышения точности, недо-

стижимые с помощью традиционных методов. Это особенно актуально для лечения переломов, где важно заранее смоделировать процесс восстановления. В исследованиях, таких как работа Izatt и его коллег, отмечены значительные улучшения: хирурги указали, что в 65% случаев анатомические детали на биомоделях были более заметны, чем при стандартных визуализациях, а в 11% – уникальны только для 3D-моделей [57]. Эти достижения подчеркивают значимость 3D-моделирования, поскольку улучшение понимания анатомических структур может непосредственно влиять на выбор материалов и расположение имплантатов, что подтверждают исследования Wu и Shao [54].

Продолжая тему точности, исследования Iannotti и соавт. демонстрируют, что применение индивидуальных инструментов в ортопедии, например, при эндопротезировании плеча, серьезно улучшает позиционирование компонентов [59]. В других работах, таких как исследование Buller, описывается, как направляющие для артропластики позволяют опытным хирур-

гам сократить отклонения ориентации на 9 градусов, тем самым повышая точность операций [56].

Комплексное использование 3D-печати и компьютерной навигации дополняет процедуры, как показано в исследовании Chen: применение данных технологий улучшило точность установки имплантатов при реконструктивных операциях на костях малого таза в 3-5 раз [23]. Это привело также к снижению радиационного воздействия и кровопотери, что отмечено при операциях на костях, таких как пяточная и большеберцовая.

Одним из крупнейших преимуществ 3D-технологий остается персонализация. Dekker и коллеги подчеркивают, что индивидуальные имплантаты на основе точных параметров анатомии пациента значительно улучшают результаты лечения, например, при сложных деформациях стопы [39]. Кроме того, перспективы биопечати открывают новые горизонты в создании биоматериалов для регенерации тканей, как указано в работах Tan и соавт. [53]. Как видно из перечисленных преимуществ, технология 3D-печати

преобразует ортопедию и травматологию, предоставляя возможность точного предоперационного планирования и создания индивидуализированных хирургических инструментов и имплантатов, что значительно повышает точность и эффективность процедур.

Однако, несмотря на значительные преимущества, применение 3D-печати в медицине сопряжено с определёнными сложностями, которые необходимо учитывать для успешной интеграции этой технологии в лечебную практику [61, 25]. Минусы 3D-печати схожи с недостатками любых новаторских технологий, включая высокие затраты и нехватку данных, что особенно важно в экономически ограниченной и дискуссионной сфере медицины, где производят кастомизированные медицинские имплантаты. Вдобавок, требуются значительное время и ресурсы для обучения медицинских специалистов использованию этой технологии на практике. Также вопросы стандартизации и регулирования требуют особого внимания для гарантии безопасности и эффективности получаемых изделий [60].

Несмотря на эти вызовы, продолжающееся усовершенствование 3D-технологий и накопление опыта в их применении обещают значительное улучшение качества медицинского обслуживания и расширение возможностей лечения, делая будущее медицины более персонализированным и эффективным.

Применение аддитивных технологий 3D-печати в диагностике и лечении патологий опорно-двигательной системы, включая переломы, костные новообразования, артрозы крупных суставов, а также врождённые и приобретённые деформации и другие состояния.

Одной из наиболее актуальных задач современной медицины является лечение пациентов с костными патологиями. Заболеваемость, связанная как с первичными костными опухолями, так и с метастазами в опорно-двигательную систему, ежегодно возрастает. Ежегодно регистрируется более 2900 случаев детского церебрального паралича и ранее выявленных остеогенных сарком. Кроме того, многие злокачественные новообразования склонны к метастазированию в костную ткань. В исследовании, осуществлённом на базе Поволжского научно-исследовательского медицинского университета Министерства здравоохранения России, были проанализированы результаты хирургического лечения 22 па-

циентов с опухолями длинных костей верхних конечностей. После удаления опухолей всем пациентам была проведена одномоментная трансплантация костной ткани. Для устранения дефектов использовались индивидуальные имплантаты, изготовленные из материала, заменяющего костную ткань, с применением технологий 3D-печати.

Все пациенты в послеоперационном периоде отметили уменьшение болевых ощущений и улучшение функции верхних конечностей. За весь период наблюдения случаев смещения имплантатов, подтверждённых рентгенологически, выявлено не было. Спустя год после операции пациенты с доброкачественными опухолями показали следующие результаты: по опроснику SF-36 средний балл составил $71,4 \pm 6,6$, по визуально-аналоговой шкале (ВАШ) – $2,5 \pm 1,5$ балла, а по шкале MSTs (оценка Общества по опухолям опорно-двигательного аппарата) – $65,1 \pm 8,3\%$. У пациентов со злокачественными изменениями показателями были: SF-36 – $39,2 \pm 4,3$ балла, ВАШ – $4,8 \pm 1,4$ балла, и MSTs – $41,8 \pm 5,2\%$ [3].

В исследовании, проведённом Verasi C.C. и соавт., рассматривается опыт применения индивидуальных титановых чашек для тазобедренных суставов, создаваемых при помощи 3D-принтера, в ревизионной артропластике у пациентов с критической потерей костной ткани. Авторы проанализировали 28 операций, проведённых у 26 пациентов, среди которых 4 пациента нуждались в повторных ревизиях. Причинами неудачных исходов стали 2 случая перипротезных инфекций, 1 случай расшатывания бедренного компонента эндопротеза и 1 случай перелома протеза [20].

Индивидуальные имплантаты продемонстрировали хорошую долговечность, без признаков миграции или ослабления на протяжении среднего периода наблюдения в 2,5 года. Исследователи пришли к выводу, что результаты использования имплантатов сопоставимы с применением антипротрузивных клеток и удлинителей. В случаях значительных повреждений вертлужной впадины, сопровождающихся тазовой диссоциацией, применение индивидуальных имплантатов может быть более эффективным [12].

Положительные результаты лечения пациентов были также отмечены в исследовании, посвящённом оценке использования индивидуализированных направляющих для позиционирования при резекции, созданных с помощью 3D-печати и прототипиро-

вания. Авторы показали, что оперативное планирование с применением этих индивидуальных направляющих и физического моделирования большеберцовой и бедренной кости приводит к статистически значимой нормализации оси нижних конечностей у всех пациентов. Области применения индивидуальных направляющих включают в себя случаи с историей воспалительных заболеваний или деформаций, а также необходимость проведения замены бедра или тазобедренного сустава. Их использование может быть предпочтительным, когда требуется избежать вскрытия костномозгового канала. Это особенно актуально при наличии массивных костных дефектов, крупных остеофитов в задних отделах мыщелков бедренной кости или при выраженном ограничении движения в коленном суставе [5].

Количество вариантов применения аддитивных технологий, таких как 3D-печать, увеличивается ежегодно в области создания индивидуальных ортов и ортопедических стелек. В исследовании [10] были разработаны методы производства таких стелек с использованием 3D-печати. Исследователи успешно достигли поставленных целей и продемонстрировали, что статистически значимое улучшение ($p < 0,05$) было зафиксировано не только по данным анкетирования AOFAS, но и по результатам биомеханических обследований пациентов. Кроме того, использование на заказ изготовленных ортопедических стелек с помощью 3D-печати показало, что они способствуют восстановлению нагрузки на нижние конечности, уменьшению боли и приближению походки к физиологической норме, внося вклад в улучшение качества жизни пациентов [10].

В исследовании Н.Н. Карякина и Р.О. Горбатова [3] представлены результаты разработки технологий создания индивидуализированных ортезов для иммобилизации суставов верхних конечностей с использованием 3D-печати. Эта технология включает в себя измерение биометрических параметров соответствующей области и определения необходимой силы для иммобилизации, на основе чего создается 3D-модель ортеза. Последующий процесс производства осуществляется с использованием FDM 3D-принтера. Созданные ортезы продемонстрировали высокую эффективность в иммобилизации, обеспечив превосходные рентгенологические и клинические результаты лечения. Они имеют ряд пре-

имущества по сравнению с традиционными методами изготовления: индивидуальная адаптация в зависимости от биометрических параметров пациента и типа патологии, легкий вес, быстрое наложение, устойчивость к влаге и обеспечение теплообмена между поврежденной областью и окружающей средой [11].

Несмотря на положительные результаты применения, локальное внедрение аддитивных технологий сталкивается с рядом трудностей, связанных со сложностью самих технологических процессов [1]. Во-первых, существует высокая стоимость оборудования и расходных материалов для 3D-печати, что может быть значительным барьером для небольших медицинских учреждений и лабораторий. Во-вторых, сама технология требует от специалистов специфического обучения и умения работать с цифровыми моделями и программами, обеспечивающими подготовку данных для принтера. В-третьих, стандартов и протоколов по использованию аддитивных технологий в медицине все еще недостаточно, что затрудняет интеграцию этих технологий в повседневную медицинскую практику.

Тем не менее, в научной литературе, посвященной проблематике переломов тазовых костей, активно обсуждается опыт использования полимерных моделей таза. Эти модели играют ключевую роль в предоперационной подготовке, позволяя хирургам проводить рациональное планирование и предварительное моделирование хирургических пластин. Это дает возможность снизить риски и улучшить результаты операций [11].

В свою очередь, исследования под руководством Cai L. и его соавт. демонстрируют, что включение 3D-моделей в процесс предоперационного планирования существенно снижает как радиационную нагрузку, так и продолжительность операции. Это особенно важно при выполнении малоинвазивного сосудистого остеосинтеза, необходимого для исправления нестабильных переломов [12].

Проанализировав публикации, посвященные 3D-технологиям, Krettek C. и Bruns N. также пришли к выводу, что уровень доказательности этих работ невысок и содержит множество методологических недостатков, таких как ограниченные выборки клинических примеров и отсутствие долгосрочных данных об эффективности [40]. Тем не менее, они подчеркивают значимость проведенных исследований, так как

аддитивные технологии предлагают огромный потенциал для медицинской отрасли, открывая возможности для персонализированной медицины и повышения эффективности хирургических вмешательств.

Индивидуальный инструментальный, созданный путем 3D-принтинга. Концепция PSI, или инструменты, адаптированные под каждого пациента, активно используется в научных публикациях и исследованиях. В мировой литературе принято обозначать это направление термином, отражающим индивидуализированный подход в медицинских процедурах. Эти двойные устройства разрабатываются на базе данных, полученных из компьютерных моделей, что позволяет значительно повысить эффективность их применения.

С использованием технологии 3D-печати такие инструменты становятся неотъемлемой частью хирургических операций, обеспечивая более рациональное вмешательство с целью увеличения точности. Особо важно это становится в контексте онкоортопедических операций, где требуется высокая степень точности и адаптивности.

Термин PSI относится к унифицированной концепции, охватывающей специальные хирургические инструменты, в том числе шаблоны и руководства, которые находят широкое применение при планировании и выполнении медицинских процедур. В некоторых ситуациях, однако, может возникнуть необходимость в проведении радикальной резекции опухоли, что требует использования более агрессивных хирургических методов.

В своем исследовании Buller L. и его коллеги сравнивают две контрольные группы пациентов. В одной группе установка вертлужного компонента проводилась стандартным методом. Во второй группе применялись технологии PSI, которые обеспечивают индивидуальный подход и повышают точность установки [56]. Результаты показали, что у пациентов, лечение которых включало использование PSI, среднее отклонение углов, таких как антеверсия и наклон, было значительно меньше, что указывает на более оптимальное смещение компонентов. Это подтверждает эффективность применения PSI не только в протезировании тазобедренных суставов, но и в более сложных операциях, таких как установка транспедикулярных винтов в позвоночнике, где важны точность и индивидуальный подход.

PSI технологии активно применяются для проведения радикальных резекций при лечении злокачественных опухолей в области тазовых костей [34]. François Gouin и его команда выполнили удаление опухоли тазовой кости у 11 пациентов с использованием PSI [28]. После завершения операций было проведено гистологическое исследование изъятых тканей. Макроскопический анализ и сравнение послеоперационных КТ-изображений с предоперационными КТ-данными позволили оценить точность выполненных хирургических вмешательств. Результаты показали, что во всех случаях края резекций были классифицированы как R0, что подтверждает полное удаление опухолевой ткани. При этом средняя точность исполнения резекции, определенная через сравнение рентгенологических изображений, составила 2,5 мм.

Индивидуальные навигационные шаблоны для установки транспедикулярных винтов в шейном отделе позвоночника. В последние годы количество публикаций, посвященных применению транспедикулярной фиксации в шейном отделе позвоночника, значительно увеличилось. Это объясняется тем, что с биомеханической точки зрения данная технология демонстрирует исключительную стабильность и в некоторых случаях может быть единственным эффективным методом коррекции патологий [28, 37, 45]. В ответ на сложившуюся потребность появились альтернативные методы, такие как использование новых хирургических технологий в спинальной неврологии. Одним из таких инновационных подходов является разработка индивидуальных навигационных шаблонов, созданных с помощью 3D-печати, которые позволяют точно устанавливать имплантируемые винтовые конструкции [23, 55].

В Российской Федерации интерес к этому направлению также проявился: первое упоминание о методологическом подходе было представлено на конференции в 2018 г., где рассматривался клинический случай пациента с неоплазией позвонка C2 [4]. Продолжая изучение данного вопроса, в 2019 г. Р.А. Коваленко и его коллеги опубликовали исследование, в котором обсуждалось использование шаблонов для установки транспедикулярных винтов в субаксиальном и верхнегрудном отделах позвоночника [6]. Они сообщили, что из 88 установленных винтов точность соответствия классу 1 и 2

составила 97%. Кроме того, уровень безопасности имплантации 0 был достигнут в 79 случаях (89,77%), уровень 1 – в 5 случаях (5,68%) и уровень 3 – в 2 случаях (2,27%).

Ранее в 2015 г. Abumi K. и его коллеги продемонстрировали успешное внедрение данной методики, установив 80 транспедикулярных винтов в субаксиальном отделе шейного позвоночника с использованием трех типов индивидуальных 3D-навигационных матриц для каждого позвонка. Эти матрицы обеспечили точное определение точек входа, направление сверления и навигацию при установке винтов [26]. Из 80 установленных винтов 78 оказались с уровнем безопасности 0. Также было отмечено, что отсутствие необходимости в ретракции паравerteбральных мышц в средней части шейного отдела позволяло использовать дополнительные инструменты для отведения мягких тканей [34].

Однако несколько исследователей указывают на потенциальные ошибки, связанные с недостаточной точностью адаптации навигационного шаблона к позвоночнику [4]. Особенно в субаксиальной области, где значительный угол конвергенции может потребовать выполнения дополнительного разреза для корректного направления инструмента. Иногда также возникает необходимость в модификации части навигационного шаблона для успешной установки винтов с противоположной стороны [48].

Таким образом, инновационные подходы в 3D-навигации и индивидуальных шаблонах значительно повышают точность и безопасность имплантации транспедикулярных винтов в сложных случаях. Однако необходимы дальнейшие исследования и совершенствование технологий, чтобы минимизировать возможные ошибки и расширить их применение в клинической практике.

Использование навигационных шаблонов-направителей в области ортопедии. В последние годы разрабатываются и активно применяются передовые технологии в области ортопедии, расширяющие возможности хирургов при лечении заболеваний позвоночника. Один из таких методов – использование навигационных шаблонов-направителей, которые значительно улучшают точность установки имплантатов. Эти шаблоны особенно важны в таких случаях, как коррекция сколиоза у детей, где точность и безопасность процедуры имеют решающее значение [2, 4].

Анализ использования навигационных шаблонов-направителей в области ортопедии показывает, как транспедикулярная фиксация становится основным методом хирургической стабилизации позвоночника. В исследовании, проведенном А.В. Косулиным и его коллегами, изучено применение индивидуальных навигационных шаблонов для установки транспедикулярных винтов у детей с деформациями позвоночника. В исследовании показано, что на основе предоперационной компьютерной томографии создавались 3D-модели, по которым разрабатывались и изготавливались навигационные шаблоны из полилактида (PLA) на 3D-принтере [7]. Во время операций шаблоны использовались для точного позиционирования винтов. Результаты показали, что 93,7% винтов были установлены с высокой точностью внутрикостно, подтверждая эффективность и безопасность метода. Применение этого метода позволяет не только улучшить стабильность и эффективность хирургических вмешательств, но и значительно ускорить процесс восстановления пациентов. Данная технология открывает новые возможности для индивидуализации лечения и оптимизации хирургических процедур в детской ортопедии.

Дополняя эти выводы, авторы Д.Н. Кокушин, С.В. Виссарионов, А.Г. Баиндурашвили и коллеги провели исследование, оценив применение шаблонов-направителей (ШН) для установки транспедикулярных винтов (ТВ) у детей с врожденным сколиозом. Наиболее эффективным оказался второй вариант моносегментарного ШН, обеспечивший корректную установку 93,7% винтов. Это позволило повысить точность процедуры и минимизировать риски мальпозиций, без возникновения неврологических нарушений в послеоперационном периоде. Авторы подчеркнули значимость учета анатомо-морфологических особенностей при планировании установки ТВ у детей [8].

Следует отметить, что публикация Р.А. Коваленко и соавт. акцентировала внимание на применении индивидуальных навигационных шаблонов для установки винтов в субаксиальном шейном и верхнем грудном отделах позвоночника. Исследование определило риск имплантации, при этом в 79 случаях (89,77%) винты были установлены без отклонений (0 степень), в 5 случаях (5,68%) наблюдалось незначительное отклонение (1 степень) и в 2 случаях (2,27%) были выявлены

серьезные отклонения (3 степень). Матрица была разработана с учетом трех точек контакта на дугах позвонков и суставах, а также на остром отростке, с закреплением направляющих трубок ребрами жесткости. Канал для установки винта формировался посредством сверла или проволоки Киришнера, направлявшегося через трубку. Разработка и применение таких матриц могут значительно снизить риск имплантационных ошибок, что имеет ключевое значение для увеличения безопасности и эффективности хирургического вмешательства [6].

Использование физических 3D-моделей в медицинской практике предоставляет ряд преимуществ в сравнении с традиционными методами визуализации, такими как КТ и МРТ, а также с виртуальными реконструкциями. К примеру, исследования Auricchio и Marconì подтверждают, что трехмерная печать активно внедряется в ортопедию и травматологию для улучшения предоперационного планирования и моделирования сложных анатомических структур [21]. Это соответствует нашим выводам о том, что физические модели позволяют сократить ошибки, возникающие из-за ограниченного понимания объема, угла обзора и освещения при работе с двумерными изображениями.

Исследование Sheth и коллег особо уделяет внимание применению 3D-печати в составе предоперационного планирования при нестабильности плечевого сустава [51]. Это коррелирует с нашими наблюдениями, что физические модели помогают хирургам точнее оценивать анатомические отклонения, например, при корректровке деформаций тазобедренного сустава и других сложных вмешательствах. Другие исследования, такие как работы Mazzaresse и коллег и Smoczok и соавт., отмечают потенциал 3D-печати в моделировании имплантатов и разработке фиксаторов из абсорбирующих полимеров, что доказывает возможность улучшения хирургической коррекции и адаптации инструментов под индивидуальные потребности пациента [42, 52]. Наконец, работы авторов Trauner [62], Kang и коллег [22] подчеркивают, что 3D-печать не только изменяет подход к планированию хирургического вмешательства, но и способствует обучению и повышает квалификацию начинающих хирургов, что также является одним из ключевых выводов нашего исследования. В целом, многообразие исследований показывает, что

3D-печать имеет значительный потенциал для трансформации ортопедической практики и обучения.

Таким образом, в области ортопедии и травматологии технология 3D-печать позволяет заранее планировать хирургические процедуры, эта возможность может привести к улучшению результатов вмешательства и сокращению времени операции. Напечатанные на 3D-принтере модели могут стать полезным инструментом для обучения начинающих хирургов, повышая качество подготовки и ускоряя процесс обучения.

Заключение. Анализ научной литературы показал, что применение 3D-печати в ортопедической хирургии и травматологии открывает новые горизонты для индивидуализации лечения и повышения качества медицинской помощи. Технология способствует более точному предоперационному планированию, позволяет создавать адаптированные под пациента модели и инструменты, что снижает операционные риски и улучшает результаты операций. Однако для успешной интеграции 3D-печати в клиническую практику необходимо преодоление ряда вызовов, включая высокие затраты, необходимость обучения специалистов и разработку стандартов. Несмотря на эти препятствия, продолжающееся совершенствование технологий и накопление опыта их применения могут существенно повысить эффективность и персонализацию медицинских вмешательств, делая будущие медицинские практики более точными и безопасными.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в связи с публикацией данной статьи.

Литература

- 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). С. 124–128. doi: 10.19163/1994-9480-2018-3(67)-124-128
- Gorbato R.O., Kazakov A.A., Romanov A.D. Development of technology for creating individual orthoses for immobilization of upper limb joints using 3D printing // Bulletin of VolgSMU. 2018. No. 3 (67). P. 124-128. doi: 10.19163/1994-9480-2018-3(67)-124-128
- Индивидуальные навигационные шаблоны для установки транспедикулярных винтов в хирургии позвоночника: систематический обзор / Е.В. Ковалёв, С.И. Кириленко, А.Н. Мазуренко [и др.] // Проблемы здоровья и экологии. 2022. №.19(3). С.5–17. DOI: doi: 10.51523/2708-6011.2022-19-3-01
- A.N. Mazurenko, [et al.] // Problems of health and ecology. 2022. No.19(3). P.5-17. DOI: doi: 10.51523/2708-6011.2022-19-3-01
- Карякин Н.Н., Горбатов Р.О. Технология создания индивидуальных ортопедических стелек с использованием 3D печати // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 3. С.42
- Karyakin N.N., Gorbato R.O. Technology of creating individual orthopedic insoles using 3D printing // Modern problems of science and education. 2017. No. 3. P.42
- Компьютерное 3D-моделирование с изготовлением индивидуальных лекал для навигирования введения винтов в шейном отделе позвоночника / А.В. Бурцев, О.М. Павлова, С.О. Рябых [и др.] // Хирургия позвоночника. 2018. Т. 15, №2. С. 33–38.
- 3D computer modeling with the production of individual patterns for navigating the insertion of screws in the cervical spine / A.V. Burtsev, O.M. Pavlova, S.O. Ryabykh, [et al.] // Spine surgery. 2018. Vol. 15. No. 2. P. 33-38.
- Применение аддитивных технологий 3D-печати в травматологии-ортопедии и нейрохирургии / А.В. Яриков, Р.О. Горбатов, И.И. Столяров [и др.] // Врач. 2021. №.32 (10). С. 8–16. doi: 10.29296/25877305 2021-10-02
- Application of additive 3D printing technologies in traumatology-orthopedics and neurosurgery / A.V. Yarikov, R.O. Gorbato, I.I. Stolyarov [et al.] // Doctor. 2021. No. 32 (10). P. 8-16. doi: 10.29296/25877305 2021-10-02
- Применение индивидуальных 3D-навигационных матриц для транспедикулярной фиксации субаксиальных шейных и верхнегрудных позвонков / Р.А. Коваленко, В.В. Руденко, В.А. Кашин [и др.] // Хирургия позвоночника. 2019. Т. 16, №2. С. 35–41.
- Application of individual 3D navigation matrices for transpedicular fixation of subaxial cervical and upper thoracic vertebrae / R.A. Kovalenko, V.V. Rudenko, V.A. Kashin, [et al.] // Spinal surgery. 2019. Vol. 16. № 2. P. 35-41.
- Применение навигационного шаблона для прохождения ножки позвонка при транспедикулярной фиксации / А.В. Косулин, Д.В. Елякин, К.Д. Лебедева [и др.] // Педиатр. 2019. Т. 10, № 3. С. 45–50. doi: 10.17816/PED10345-50
- The use of a navigation template for the passage of the vertebral pedicle during transpedicular fixation / A.V. Kosulin, D.V. Elyakin, K.D. Lebedeva, [et al.] // Pediatrician. 2019. Vol. 10. No. 3. P. 45-50. doi: 10.17816/PED10345-50
- Применение шаблонов-направителей при хирургическом лечении детей дошкольного возраста с врожденным сколиозом грудной и поясничной локализации / Д.Н. Кокушин, С.В. Виссарионов, А.Г. Баиндурашвили [и др.] // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2020. Т. 8. Вып. 3. С. 305–316. doi: 10.17816/PTORS42000
- The use of guiding templates in the surgical treatment of preschool children with congenital scoliosis of thoracic and lumbar localization / D.N. Kokushin, S.V. Vissarionov, A.G. Baindurashvili, [et al.] // Orthopedics, traumatology and reconstructive surgery of childhood. 2020. Vol. 8. Issue 3. P. 305-316. doi: 10.17816/PTORS42000
- Хирургическое лечение детей с врожденными деформациями грудного и поясничного отделов позвоночника с использованием технологии 3d-прототипирования / А.Е. Бойко, Д.Н. Кокушин, А.Г. Баиндурашвили [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 7. С. 57–61
- Surgical treatment of children with congenital deformities of the thoracic and lumbar spine using 3D prototyping technologies / A.E. Boyko, D.N. Kokushin, A.G. Baindurashvili, [et al.] // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2020. No. 7. P. 57-61
- Хирургическое лечение пациентов с опухолями длинных трубчатых костей верхних конечностей с использованием индивидуальных имплантатов из костнозамещающего материала, созданных по технологиям 3D-печати / Н.Н. Карякин, Р.О. Горбатов, А.Е. Новиков [и др.] // Гений ортопедии. 2017. №.23 (3). С.323–330
- Surgical treatment of patients with tumors of the long tubular bones of the upper extremities using individual implants made of bone-substituting material created using 3D printing technologies / N.N. Karyakin, R.O. Gorbato, A.E. Novikov, [et al.] // Genius of Orthopedics. – 2017. – No..23 (3). – P.323-330
- Эндопротезирование коленного сустава с применением индивидуальных направляющих, созданных с помощью технологий 3D-печати / Н.Н. Карякин, Е.Е. Малышев, Р.О. Горбатов [и др.] // Травматология и ортопедия России. 2017. №. 23 (3). С.110–118. doi: 10.21823/2311-2905-2017-23-3-110-118
- Knee arthroplasty using individual guides created using 3D printing technologies / N.N. Karyakin, E.E. Malyshev, R.O. Gorbato [et al.] // Traumatology and Orthopedics of Russia. 2017. №. 23 (3). P.110-118. doi: 10.21823/2311-2905-2017-23-3-110-118
- 3D printing-based minimally invasive cannulated screw treatment of unstable pelvic fracture / L. Cai, Y. Zhang, C. Chen [et al.] // J Orthop Surg Res. 2018. №.13(1). P.71. doi: 10.1186/s13018-018-0778-1
- 3-dimensionally printed patient-specific glenoid drill guides vs. standard non-specific instrumentation: a randomized controlled trial comparing the accuracy of glenoid component placement in anatomic total shoulder arthroplasty / S. P. Dasari, M. E. Menendez, A. E. Orias [et al.] // Journal of Shoulder and Elbow Surgery. 2024. Vol. 33, No. 2. P. 223–233.
- 3D-printed ABS and PLA scaffolds for cartilage and nucleus pulposus tissue regeneration / D. H. Rosenzweig, E. Carelli, T. Steffen [et al.] // Int J Mol Sci. 2015. Vol. 16. P. 15118-15135.
- A review of current clinical applications of three-dimensional printing in spine surgery / W. Cho, A.V. Job, J. Chen [et al.] // Asian Spine J. 2018. Vol. 12, No. 1. P. 171-177. doi: 10.4184/asj.2018.12.1.171.
- Accuracy and practicability of a patient-specific guide using acetabular superolateral rim during THA in Crowe II/III DDH patients: a retrospective study / C. Wang, H. Xiao, W. Yang, [et al.] // Journal of Orthopaedic Surgery and Research. 2019. Vol. 14, No. 1. P. 19. doi:10.1186/s13018-018-1029-1
- Accuracy of patient-specific guided implantation of the glenoid component in reversed shoulder arthroplasty / O. Verborgt, A.I. Hachem, K. Eid [et al.] // Orthop Traumatol Surg Res. 2018. Vol. 104, No. 6. P. 767-772. doi: 10.1016/j.otsr.2018.01.010.
- Application of 3D printing rapid prototyping-assisted percutaneous fixation in the treatment of intertrochanteric fracture / S.N. Zheng, Q.Q. Yao, F.Y. Mao [et al.] // Exp Ther Med. 2017. Vol. 14, No. 4. P. 3644-3650.
- Applications and accuracy of 3D-printed surgical guides in traumatology and orthopaedic surgery: a systematic review and meta-analysis / S. Hess, J. Husarek, M. Müller, [et al.] // J Exp Orthop. 2024. Vol. 11, No. 3. e12096. doi: 10.1002/jeo2.12096. PMID: 39135870; PMCID: PMC11317891.

Individual navigation templates for installing transpedicular screws in spinal surgery: a systematic review / E.V. Kovalev, S.I. Kirilenko,

20. Are custom triflange acetabular components effective for reconstruction of catastrophic bone loss? / C.C. Berasi, K.R. Berend, J.B. Adams, [et al.] // *Clin Orthop Relat Res.* 2014. №.473 (2). P.528–535. doi: 10.1007/s11999-014-3969-z
21. Auricchio F., Marconi S. 3D printing: clinical applications in orthopaedics and traumatology // *EFORT Open Rev.* 2017. Vol. 1, No. 5. P. 121-127. doi: 10.1302/2058-5241.1.000012. PMID: 28461938; PMCID: PMC5367547.
22. Can preoperative 3D printing change surgeon's operative plan for distal tibia fracture? / Kang H. J., Kim B. S., Kim S. M. [et al.] // *Biomed Res Int.* 2019. 7059413.
23. Clinical use of 3D printing guide plate in posterior lumbar pedicle screw fixation / H. Chen, D. Wu, H. Yang, [et al.] // *Med Sci Monit.* 2015. Vol. 21. P. 3948-54. doi: 10.12659/msm.895597.
24. Comparison of patient-specific instruments with standard surgical instruments in determining glenoid component position: a randomized prospective clinical trial / M.D. Hendel, J.A. Bryan, W.K. Barsoum [et al.] // *Journal of Bone and Joint Surgery.* 2012. Vol. 94, No. 23. P. 2167–2175. doi: 10.2106/JBJS.K.01209
25. Comparison of the conventional surgery and the surgery assisted by 3D printing technology in the treatment of calcaneal fractures / W. Zheng, Z. Tao, Y. Lou, [et al.] // *J Invest Surg.* 2018. Vol. 31, No. 6. P. 557-567.
26. Complications of pedicle screw fixation in reconstructive surgery of the cervical spine / K. Abumi, Y. Shono, M. Ito, [et al.] // *Spine (Phila Pa 1976).* 2000. №.25(8). P. 962–969. doi: 10.1097/00007632-200004150-00011. PMID: 10767809.
27. Computer-assisted 3-dimensional reconstructions of scaphoid fractures and nonunions with and without the use of patient-specific guides: early clinical outcomes and postoperative assessments of reconstruction accuracy / A. Schweizer, F. Mauler, L. Vlachopoulos, [et al.] // *J Hand Surg Am.* 2016. Vol. 41, No. 1. P. 59-69. doi: 10.1016/j.jhsa.2015.10.009.
28. Computer-Assisted Planning and Patient-Specific Instruments for Bone Tumor Resection within the Pelvis: A Series of 11 Patients / F. Gouin, L. Paul, G.A. Odri [et al.] // *Sarcoma.* 2014. P. 842709. doi: 10.1155/2014/842709. – PMID: 25100921; PMCID: PMC4101950.
29. Development of a 3-D printing laboratory for foot and ankle applications / C. E. Pehde, J. Bennett, B. Lee Peck, [et al.] // *Clin Podiatr Med Surg.* 2020. Vol. 37, No. 2. P. 195-213. doi: 10.1016/j.cpm.2019.12.011.
30. Effect of 3D printing technology on pelvic fractures: a Meta-analysis / Y.D. Zhang, R.Y. Wu, D.D. Xie, [et al.] // *Zhongguo Gu Shang.* 2018. Vol. 31, No. 5. P.465-471. doi: 10.3969/j.issn.10030034.2018.05.013.
31. Effect of postoperative mechanical axis alignment on the fifteen-year survival of modern, cemented total knee replacements / S. Parratte, M.W. Pagnano, R.T. Trousdale, [et al.] // *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume.* 2010. Vol. 92, No. 12. P. 2143–2149. doi:10.2106/JBJS.I.01398
32. Efficacy of three-dimensional guide plate technique guided sacral 2 alar iliac screws fixation in patients with degenerative kyphoscoliosis / L. Cui, S. Gong, S. Xie, [et al.] // *American Journal of Translational Research.* 2021. Vol. 13, No. 5. P. 5127–5136.
33. Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences / B.C. Gross, J.L. Erkal, S.Y. Lockwood [et al.] // *Anal Chem.* 2014. Vol. 86, No. 7. P. 3240-3253. doi:10.1021/ac403397r
34. Evaluation of a transpedicular drill guide for pedicle screw placement in the thoracic spine / J.M. Mac-Thiong, H. Labelle, M. Rooze, [et al.] // *Eur Spine J.* 2003. №.12(5). P. 542-547. doi: 10.1007/s00586-003-0549-4. – PMID: 12783286; PMCID: PMC3468009.
35. Hydroxyapatite scaffolds for bone tissue engineering made by 3D printing / B. Leukers, H. Glkan, S.H. Irsen [et al.] // *J Mater Sci Mater Med.* 2005. Vol. 16, No. 12. P. 1121-1124. doi: 10.1007/s10856-005-4716-5.
36. Impacted bone allograft personalised by a novel 3D printed customization kit produces high surgical accuracy in medial opening wedge high tibial osteotomy: a pilot study / W. Van Genechten, A. Van Haver, S. Bartholomeeusen [et al.] // *Journal of Experimental Orthopaedics.* 2023. Vol. 10, No. 1. P. 24. doi:10.1186/s40634-023-00593-0
37. Individualized 3D printing navigation template for pedicle screw fixation in upper cervical spine / F. Guo, J. Dai, J. Zhang, [et al.] // *PLoS One.* 2019. №.14(2). P.e0212213. doi: 10.1371/journal.pone.0212213. PMID: 28152039; PMCID: PMC5289602.
38. Is TKA using patient-specific instruments comparable to conventional TKA? A randomized controlled study of one system / Y.W. Roh, T.W. Kim, S. Lee [et al.] // *Clinical Orthopaedics and Related Research.* 2013. Vol. 471, No. 12. P. 3988–3995. doi:10.1007/s11999-013-3206-1
39. Jr. Use of patient-specific 3D-printed titanium implants for complex foot and ankle limb salvage, deformity correction, and arthrodesis procedures / T.J. Dekker, J.R. Steele, A.E. Federer et al. // *Foot Ankle Int.* 2018. Vol. 39, No. 8. P. 916-921. doi: 10.1177/1071100718770133.
40. Krettek C., Bruns N. Current concepts and new developments of 3D printing in trauma surgery // *Unfallchirurg.* 2019. No.122(4). P.256-269.– doi: 10.1007/s00113-019-0636-6.
41. Matsukawa K., Kaito T., Abe Y. Accuracy of cortical bone trajectory screw placement using patient-specific template guide system // *Neurosurgical Review.* 2020. Vol. 43, No. 4. P. 1135–1142. doi:10.1007/s10143-019-01140-1
42. Mazzaresse B., Nicotera N., Theriault H. Modeling bone fixation implants with absorbable polymers using 3-D printing // *Biomedical Engineering Conference (NEBEC), 2015 41st Annual Northeast 2015;* 7117129.
43. Novel alignment measurement technique for total knee arthroplasty using patient specific instrumentation / K. Yamamura, Y. Minoda, S. Mizokawa, [et al.] // *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery.* 2017. Vol. 137, No. 3. P. 401–407. doi:10.1007/s00402-017-2628-8
44. Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering / V. Mironov, T. Boland, T. Trusk [et al.] // *Trends Biotechnol.* 2003. Vol. 21, No. 4. P. 157-161. doi:10.1016/S0167-7799(03)00033-7.
45. Patient Specific Instruments for Complex Tumor Resection-Reconstruction Surgery within the Pelvis: A Series of 4 Cases / E. Cernat, P.-L. Docquier, L. Paul [et al.] // *Chirurgia.* 2016. №.111(5). 439-444. doi: 10.21614/chirurgia.111.5.439. PMID: 27819644.
46. Patient-specific glenoid guides provide accuracy and reproducibility in total shoulder arthroplasty / M.O. Gauci, P. Boileau, M. Baba [et al.] // *The Bone & Joint Journal.* 2016. Vol. 98-B. P. 1080–1085.
47. Pedicle screw placement safety with the aid of patient-specific guides in a case series of patients with thoracic scoliosis / J. Mohar, M. Valiĉ, E. Podovšovnik, [et al.] // *European Spine Journal.* 2022. Vol. 31, No. 12. P. 3544–3550. doi:10.1007/s00586-022-07427-0
48. Personalised image- based templates for intraoperative guidance / E. Berry, M. Cuppone, S. Porada [et al.] // *Proc Inst Mech Eng H.* 2005. No. 219(2). P.111-118. doi: 10.1243/095441105X9273. – PMID: 15819482.
49. Proper benefit of a three-dimensional pre-operative planning software for glenoid component positioning in total shoulder arthroplasty / A. Jacquot, M. O. Gauci, J. Chaoui, [et al.] // *Int Orthop.* 2018. Vol. 42, No. 12. P. 2897-2906. doi: 10.1007/s00264-018-4037-1.
50. Sariali E., Kajetanek C., Catonné Y. Comparison of custom cutting guides based on three-dimensional computerized CT-scan planning and a conventional ancillary system based on two-dimensional planning in total knee arthroplasty: a randomized controlled trial // *International Orthopaedics.* 2019. Vol. 43, No. 11. P. 2529–2538. doi:10.1007/s00264-019-04357-3
51. Sheth U., Theodoropoulos J., Abouali J. Use of 3-dimensional printing for preoperative planning in the treatment of recurrent anterior shoulder instability // *Arthrosc Tech.* 2015. Vol. 4. e311-e316. PMID: 26759768.
52. Smoczok M., Starszak K., Starszak W. 3D printing as a significant achievement for application in posttraumatic surgeries - a literature review // *Curr Med Imaging.* 2021. Vol. 17, No. 7. P. 814-819. doi: 10.2174/157340561666620051000381. PMID: 32386498.
53. Tan G., Zhou Y., Sooriyaarachchi D. Musculoskeletal tissue engineering using fibrous biomaterials // *Methods Mol Biol.* 2021. Vol. 2193. P. 31-40. doi: 10.1007/978-1-0716-0845-6_4
54. The accuracy of a method for printing three-dimensional spinal models / Wu A.M., Shao Z.X., Wang J.S. [et al.] // *PLoS One.* 2015. Vol. 10, No. 4. e0124291. doi: 10.1371/journal.pone.0124291.
55. The accuracy of patient-specific instrumentation with laser guidance in a dynamic total hip arthroplasty: a radiological evaluation / Ferretti A., Iannotti F., Proietti L., [et al.] // *Sensors.* 2021. Vol. 21, No. 12. P. 4232. doi:10.3390/s21124232
56. The use of patient-specific instrumentation improves the accuracy of acetabular component placement / Buller L., Smith T., Bryan J. [et al.] // *J Arthroplasty.* 2013. №.28(4). P.631-636. doi: 10.1016/j.arth.2012.12.001. PMID: 23498350.
57. The use of physical biomodelling in complex spinal surgery / Izatt M.T., Thorpe P.L., Thompson R.G., [et al.] // *Eur Spine J.* 2007. Vol. 16, No. 9. P. 1507-1518. doi:10.1007/s00586-006-0289-3.
58. Three-dimensional analysis of accuracy of component positioning in total knee arthroplasty with patient specific and conventional instruments: a randomized controlled trial / De Vloo R., Pellikaan P., Dholander A. [et al.] // *The Knee.* 2017. Vol. 24, No. 6. P. 1469-1477. doi: 10.1016/j.knee.2017.08.059
59. Three-dimensional imaging and templating improve glenoid implant positioning / Iannotti J.P., Weiner S., Rodriguez E. [et al.] // *J Bone Joint Surg Am.* 2015. Vol. 97, No. 8. P. 651-658. doi: 10.2106/JBJS.N.00493.
60. Three-dimensional printing in orthopaedic surgery: current applications and future developments / Wixted C.M., Peterson J.R., Kadakia R.J., [et al.] // *J Am Acad Orthop Surg Glob Res Rev.* 2021. Vol. 5, No. 4. e20.00230-11. doi: 10.5435/JAAOSGlobal-D-20-00230. PMID: 33877073; PMCID: PMC8059996.
61. Three-dimensional printing technology in orthopaedics / Skelley N.W., Smith M.J., Ma R. [et al.] // *J Am Acad Orthop Surg.* 2019. Vol. 27, No. 24. P. 918-925. doi: 10.5435/JAAOS-D-18-00746.
62. Trauner K.B. The emerging role of 3D

printing in arthroplasty and orthopedics // J Arthroplasty. 2018. Vol. 33. P. 2352-2354.

63. Use of 3D printing in complex spinal surgery: historical perspectives, current usage, and

future directions / Grant C.A., Izatt M.T., Labrom R.D. [et al.] // Tech Orthop. 2016. Vol. 31, No. 3. P. 172-180.

64. Uso de planificación preoperatoria e im-

presión 3D en ortopedia y traumatología: ingresando en una nueva era / Moya D., Gobbato B., Valente S. [et al.] // Acta Ortop Mex. 2022. Vol. 36, No. 1. P. 39-47. Spanish. PMID: 36099572.

DOI 10.25789/YMJ.2025.89.23

УДК 616.1-616.16

А.А. Нурсеитова, К.А. Кравцова, А.А. Малахова,
С.Л. Аврусин, А.Г. Кудряшова, Т.С. Лихачёва,
О.В. Калашникова, И.С. Аврусин, Т.Е. Бурцева

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КАПИЛЛЯРОСКОПИИ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СИСТЕМНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ У ДЕТЕЙ

В статье представлены современные данные о возможности использования метода капилляроскопии в диагностике системных заболеваний. Метод капилляроскопии может быть широко использован в педиатрии благодаря своим преимуществам – простоте, неинвазивности, относительно низкой стоимости, возможности повторного исследования.

Ключевые слова: капилляроскопия, микроциркуляция, педиатрия, ревматология, системные заболевания соединительной ткани, синдром Рейно, системная склеродермия, ювенильный дерматомиозит.

The article presents current data on the possibility of using capillaroscopy as a method of diagnostics of systemic diseases. Capillaroscopy can be widely used in pediatrics due to the following advantages: simplicity, non-invasiveness, relatively low cost, and possibility of repeated examination.

Keywords: capillaroscopy, microcirculation, pediatrics, rheumatology, systemic connective tissue diseases, Raynaud's syndrome, systemic scleroderma, juvenile dermatomyositis.

Для цитирования: Нурсеитова А.А., Кравцова К.А., Малахова А.А., Аврусин С.Л., Кудряшова А.Г., Лихачёва Т.С., Калашникова О.В., Аврусин И.С., Бурцева Т.Е. Использование метода капилляроскопии при диагностике системных заболеваний у детей. Якутский медицинский журнал. 2025; 89(1): 102-107. <https://doi.org/10.25789/YMJ.2025.89.23>

ФГБОУ ВО СПбГПМУ МЗ РФ, 194100, г. Санкт-Петербург, ул. Литовская, 2: **НУРСЕИТОВА Асель Абилсеитовна** – студентка 6 курса, ORCID 0009-0001-9269-5035, Nurseitova.2001@mail.ru, **КРАВЦОВА Кира Александровна** – студентка 6 курса, ORCID 0000-0002-0039-4180, kravtsova0756@mail.ru, **МАЛАХОВА Александра Алексеевна** – студентка 6 курса, ORCID 0009-0001-6964-3624, ivashchenkova_a@inbox.ru, **АВРУСИН Сергей Львович** – к.м.н., ст. лаборант, ORCID 0000-0002-0039-1799, avrusin4@gmail.com, **КУДРЯШОВА Анастасия Григорьевна** – студентка 6 курса, ORCID 0009-0008-3084-012X, kuleshova130302@gmail.com, **ЛИХАЧЁВА Татьяна Серафимовна** – ассистент кафедры, ORCID 0000-0002-0953-5453, tatianaSL@list.ru, **КАЛАШНИКОВА Ольга Валерьевна** – к.м.н., доцент, ORCID 0000-0002-8683-4270, koira7@yandex.ru, **АВРУСИН Илья Сергеевич** – к.м.н., ассистент кафедры, ORCID 0000-0002-4919-0939, avrusin95@gmail.com. **БУРЦЕВА Татьяна Егоровна** – д.м.н., доцент, проф. Медицинского института СВФУ им. М.К. Аммосова (677000, г. Якутск, ул. Кулаковского, 36), в.н.с.-руковод. лаб. ЯНЦ КМП (677000, г. Якутск, ул. Ярославского, 6/3), ORCID 0000-0002-5490-2072, bourtsevat@yandex.ru.

Капилляроскопия представляет собой неинвазивный метод исследования микроциркуляции, основанный на визуализации капилляров через кожу, который играет ключевую роль в дифференциальной диагностике первичного и вторичного феномена Рейно, а также успешно используется для диагностики таких заболеваний, как системная склеродермия, ювенильный дерматомиозит, может быть использован для их стадирования и оценки активности. Также капилляроскопия может быть полезна для оценки микроциркуляции при других ревматических заболеваниях, таких как системная красная волчанка, антифосфолипидный синдром, ювенильный идиопатический / ревматоидный артрит, синдром Шегрена.

Современный этап развития капилляроскопии начался в 1980-х гг. с внедрением видеокапилляроскопии, что позволило проводить цифровой анализ изображений. К данному моменту разработаны стандартизированные критерии и протоколы оценки капилляроскопической картины у взрослых [19, 24, 27, 29, 30]. Однако всё ещё не-

достаточно исследований, посвящённых особенностям капилляроскопии у детей, хотя в последние годы активно ведутся работы по её стандартизации для несовершеннолетних пациентов [23, 33].

Метод капилляроскопии информативен при системных заболеваниях. Капилляроскопическими признаками микроангиопатии являются [29]:

- изменение плотности капилляров (в норме плотность капилляров 7 мм);
- изменения диаметра капилляров (в норме диаметр капилляра, как правило, не превышает 20 мкм);
- появление аваскулярных участков - аваскулярные зоны определяются при отсутствии 2 и более последовательных капилляров;
- микрогеморрагии - визуализируются в виде маленьких темных пятен, представляющих собой депо гемосидерина;
- неоангиогенез – новообразование капилляров (новообразованные капилляры могут быть представлены в виде спиралевидных, ветвистых или кустовидных капилляров);