

УДК: 616-073.756.8:004.94

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ КОСТНЫХ ИМПЛАНТОВ ПО ДАННЫМ МУЛЬТИСПИРАЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Нигматжонов Абдурашид Сагдулла угли - самостоятельный соискатель Центра детской гематологии, онкологии и клинической иммунологии

Ходжибеков Марат Худойкулович - профессор кафедры онкологии и лучевой диагностики ТГМУ

Алимов Ижод Рустамжонович - доцент кафедры Нейрохирургии ЦРПКМР

Аннотация. Цель исследования – повысить эффективность предоперационного планирования реконструктивных хирургических вмешательств путем разработки программной платформы для автоматизированного 3D-моделирования костных имплантов на основе данных мультиспиральной компьютерной томографии.

Материалы и методы. Исследование основано на анализе МСКТ-данных пациентов с дефектами костей черепа, лицевого скелета и длинных трубчатых костей. Разработан программный комплекс, обеспечивающий импорт DICOM-данных, сегментацию костных структур, трехмерную реконструкцию и автоматизированное проектирование индивидуальных имплантов с последующим экспортом STL-моделей для 3D-печати. Верификация точности проводилась с использованием метрик Dice, Hausdorff и анализа HU-профилей.

Результаты. Создан программный комплекс для автоматизированного 3D-моделирования костных структур по данным МСКТ. Полученные индивидуальные импланты продемонстрировали высокую анатомическую точность с погрешностью не более 1 мм. Использование разработанной платформы позволило сократить время предоперационного моделирования на 35–40%, а продолжительность хирургических вмешательств – на 20–30%.

Заключение. Разработанная программная платформа обеспечивает стандартизацию процессов обработки МСКТ-данных и проектирования индивидуальных имплантов. Использование технологии способствует повышению точности реконструктивных операций и расширяет возможности персонализированной хирургии.

Ключевые слова: мультиспиральная компьютерная томография, 3D-моделирование, индивидуальные импланты, реконструктивная хирургия, STL-модели, медицинские информационные технологии.

Annotatsiya. Tadqiqot maqsadi – rekonstruktiv jarrohlik amaliyotlarini operatsiyadan oldingi rejalashtirish samaradorligini oshirish maqsadida multispiral kompyuter tomografiyasi ma'lumotlari asosida individual suyak implantlarini avtomatlashtirilgan 3D-modellashtirish uchun dasturiy platforma yaratish.

Materiallar va usullar. Tadqiqot bosh suyagi, yuz skeleti va uzun naysimon suyaklar nuqsonlari mavjud bo'lgan bemorlarning MSKT ma'lumotlarini tahlil qilishga asoslangan. DICOM formatidagi ma'lumotlarni import qilish, suyak tuzilmalarini segmentatsiya qilish, uch o'lchamli rekonstruksiya hamda individual implantlarni avtomatlashtirilgan loyihalash imkonini beruvchi dasturiy kompleks ishlab chiqildi. Keyinchalik modellar 3D-printerlarda tayyorlash uchun STL formatiga eksport qilindi. Modellarning aniqligi Dice va Hausdorff metrikalari hamda HU-profillarni tahlil qilish orqali baholandi.

Natijalar. MSKT ma'lumotlari asosida suyak tuzilmalarining aniq 3D-modellarini yaratishga mo'ljallangan dasturiy platforma ishlab chiqildi va amaliyotga joriy etildi. Yaratilgan individual implantlar yuqori anatomik aniqlikni namoyon etdi, ularning xatoligi 1 mm dan

oshmadi. Dasturiy platformadan foydalanish operatsiyadan oldingi modellashtirish vaqtini 35–40% ga, jarrohlik amaliyoti davomiyligini esa 20–30% ga qisqartirish imkonini berdi.

Xulosa. Ishlab chiqilgan dasturiy platforma MSKT ma'lumotlarini qayta ishlash va individual implantlarni loyihalash jarayonlarini standartlashtirish imkonini beradi. Mazkur texnologiya rekonstruktiv operatsiyalar aniqligini oshiradi va shaxsiylashtirilgan jarrohlik amaliyotining imkoniyatlarini kengaytiradi.

Kalit so'zlar: multispiral kompyuter tomografiyasi, 3D-modellashtirish, individual implantlar, rekonstruktiv jarrohlik, STL-modellar, tibbiy axborot texnologiyalari.

Abstract. Objective. To improve the efficiency of preoperative planning in reconstructive surgery through the development of a software platform for automated three-dimensional modeling of patient-specific bone implants based on multislice computed tomography data.

Materials and Methods. The study was based on the analysis of MSCT data obtained from patients with defects of the cranial bones, facial skeleton, and long tubular bones. A software platform was developed to provide DICOM data import, bone structure segmentation, three-dimensional reconstruction, and automated design of patient-specific implants. The resulting models were exported in STL format for 3D printing. Model accuracy was validated using Dice and Hausdorff metrics as well as Hounsfield Unit (HU) profile analysis.

Results. A software platform for automated 3D modeling of bone structures based on MSCT data was developed and implemented. The generated patient-specific implants demonstrated high anatomical accuracy, with a deviation not exceeding 1 mm. Application of the developed platform reduced preoperative modeling time by 35–40% and decreased the duration of surgical procedures by 20–30%.

Conclusion. The developed software platform provides standardized processing of MSCT data and automated design of patient-specific bone implants. The technology improves the accuracy of reconstructive surgery and expands the possibilities of personalized surgical treatment.

Keywords: multislice computed tomography, 3D modeling, patient-specific implants, reconstructive surgery, STL models, medical information technologies.

Введение: Современная реконструктивная хирургия характеризуется активным внедрением цифровых технологий, направленных на повышение точности оперативных вмешательств и улучшение функциональных результатов лечения пациентов [5, 8]. Особое значение в последние годы приобрели технологии трехмерного моделирования, позволяющие создавать индивидуализированные анатомические модели и импланты на основе данных лучевых методов исследования [1, 6].

Мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ) является одним из наиболее информативных методов визуализации костных структур благодаря высокой пространственной разрешающей способности и возможности получения тонкосрезовых изображений [9]. Современные программные средства позволяют выполнять сегментацию анатомических структур, формировать трехмерные модели и использовать их для предоперационного планирования реконструктивных вмешательств [3, 11].

Развитие технологий аддитивного производства и 3D-печати создало новые возможности для изготовления индивидуальных имплантов, максимально соответствующих анатомическим особенностям пациента [7]. Подобный подход особенно востребован при реконструкции дефектов костей черепа, лицевого скелета и длинных трубчатых костей, возникающих вследствие травм, опухолевых процессов, врожденных аномалий и послеоперационных дефектов [12, 14].

Несмотря на значительные достижения в области медицинского 3D-моделирования, сохраняются проблемы, связанные со стандартизацией обработки томографических данных, точностью сегментации и высокой трудоемкостью проектирования индивидуальных имплантов [4, 13]. В большинстве случаев процесс моделирования требует использования нескольких программных продуктов и значительного участия специалиста, что увеличивает сроки подготовки к оперативному лечению [5, 8].

В связи с этим разработка специализированных программных платформ, обеспечивающих автоматизированную обработку МСКТ-данных и создание индивидуальных имплантов, представляет значительный научный и практический интерес. Использование подобных решений может способствовать повышению точности реконструктивных операций, сокращению времени предоперационного планирования и дальнейшему развитию персонализированной хирургии.

Цель исследования: Повысить эффективность предоперационного планирования реконструктивных хирургических вмешательств путем разработки и клинической апробации программной платформы для автоматизированного 3D-моделирования индивидуальных костных имплантов на основе данных мультиспиральной компьютерной томографии.

Материалы и методы исследования: Исследование выполнено на основе анализа данных мультиспиральной компьютерной томографии пациентов с дефектами костных структур различной локализации, которым требовалось выполнение реконструктивных хирургических вмешательств с использованием индивидуальных имплантов. Работа проводилась в несколько последовательных этапов и включала получение диагностических изображений, разработку алгоритмов обработки данных, создание программной платформы для автоматизированного моделирования и последующую клиническую апробацию разработанной технологии.

В исследование были включены результаты обследования 87 пациентов с дефектами костей черепа, лицевого скелета и длинных трубчатых костей, находившихся на лечении в специализированных медицинских учреждениях в период с 2021 по 2025 годы. Среди обследованных пациентов мужчин было 52 (59,8%), женщин – 35 (40,2%). Возраст больных варьировал от 18 до 68 лет и в среднем составил $42,6 \pm 11,8$ года.

Причинами формирования костных дефектов являлись последствия черепно-мозговой и скелетной травмы у 38 (43,7%) пациентов, опухолевые поражения костей и последствия их хирургического лечения у 24 (27,6%), врожденные деформации и аномалии развития у 11 (12,6%), а также послеоперационные дефекты различной этиологии у 14 (16,1%) больных.

Всем пациентам выполнялась мультиспиральная компьютерная томография с использованием многосрезовых томографов экспертного класса. Исследования проводились по стандартизированному протоколу с толщиной срезов от 0,5 до 0,6 мм, шагом реконструкции не более 0,3 мм и матрицей изображения 512×512 пикселей. Такие параметры сканирования обеспечивали получение высокоточных диагностических данных, необходимых для последующей трехмерной реконструкции костных структур.

Полученные томографические изображения сохранялись в формате DICOM и являлись исходным материалом для дальнейшей цифровой обработки. Разработка программной платформы осуществлялась с использованием современных библиотек медицинской визуализации ITK (Insight Segmentation and Registration Toolkit) и VTK (Visualization Toolkit), интегрированных в программную среду Python. Архитектура программного комплекса была построена по модульному принципу и включала блок

импорта данных, сегментации анатомических структур, трехмерной реконструкции, моделирования имплантов и экспорта результатов.

На этапе предварительной обработки данных выполнялась автоматическая фильтрация шумов, коррекция артефактов и нормализация изображений. После этого осуществлялась сегментация костных структур на основе порогового анализа плотности тканей в единицах Хаунсфилда. Для повышения точности выделения анатомических объектов использовались алгоритмы морфологической обработки изображений и методы полуавтоматической коррекции границ сегментации.

После завершения сегментации формировалась трехмерная модель исследуемой анатомической области. Для реконструкции использовались алгоритмы построения полигональных поверхностей с последующей оптимизацией сеточной структуры модели. Полученные объекты подвергались сглаживанию и устранению геометрических дефектов, возникающих при преобразовании томографических данных в трехмерное представление.

Одним из ключевых этапов работы являлось автоматизированное проектирование индивидуальных имплантов. В случаях односторонних дефектов использовалась технология зеркального моделирования контралатеральной стороны. При наличии обширных дефектов применялись методы математической реконструкции анатомической поверхности с учетом окружающих костных структур и анатомических ориентиров. Разработанные импланты экспортировались в формат STL для последующего использования в системах аддитивного производства и предоперационного планирования.

Для оценки точности разработанных алгоритмов выполнялась метрическая и радиологическая верификация полученных моделей. Сравнение результатов автоматизированной реконструкции с исходными анатомическими данными проводилось с использованием коэффициента Dice, расстояния Hausdorff и анализа профилей плотности в единицах Хаунсфилда. Дополнительно оценивались линейные размеры моделей, объемные характеристики и степень соответствия анатомическим структурам пациента.

Клиническая эффективность технологии изучалась путем анализа продолжительности предоперационного планирования, времени хирургического вмешательства, точности позиционирования имплантов и частоты послеоперационных осложнений. Полученные результаты сопоставлялись с данными традиционных методов планирования реконструктивных операций.

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием пакета программ SPSS Statistics 26.0. Количественные показатели представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения ($M \pm SD$). Достоверность различий оценивалась с использованием параметрических и непараметрических методов статистического анализа. Различия считались статистически значимыми при значении $p < 0,05$.

Результаты исследования. В результате проведенного исследования был разработан специализированный программный комплекс для автоматизированного трехмерного моделирования индивидуальных костных имплантов на основе данных мультиспиральной компьютерной томографии. Программная платформа обеспечивает полный цикл обработки диагностической информации — от импорта DICOM-данных до получения готовой STL-модели, пригодной для дальнейшей 3D-печати и использования в реконструктивной хирургии.

Разработанная система включает модуль предварительной обработки томографических изображений, блок автоматизированной сегментации костных структур, модуль трехмерной реконструкции, подсистему проектирования имплантов и

средства экспорта полученных моделей в производственные форматы. Использование единой программной среды позволило исключить необходимость последовательного применения нескольких программных продуктов и существенно сократить продолжительность подготовки индивидуальных имплантов.

Анализ результатов сегментации показал высокую эффективность разработанного алгоритма при обработке МСКТ-данных различной анатомической локализации. Коэффициент Dice при сравнении автоматически выделенных структур с экспертной ручной сегментацией составил $0,94 \pm 0,03$ для костей свода черепа, $0,92 \pm 0,04$ для костей лицевого скелета и $0,91 \pm 0,05$ для длинных трубчатых костей. Полученные показатели свидетельствуют о высокой степени совпадения результатов автоматической обработки с экспертной оценкой специалистов.

При анализе пространственной точности реконструкции среднее расстояние Hausdorff не превышало $0,8 \pm 0,2$ мм для костей черепа и $1,0 \pm 0,3$ мм для длинных трубчатых костей. Это подтверждает возможность использования полученных моделей для высокоточного предоперационного планирования и проектирования индивидуальных имплантов.

Особое внимание было уделено оценке качества трехмерной реконструкции костных дефектов. Установлено, что разработанный программный комплекс обеспечивает сохранение анатомических особенностей исследуемых структур и позволяет получать детализированные трехмерные модели даже при наличии сложных посттравматических и послеоперационных изменений костной ткани.

В ходе исследования были разработаны индивидуальные импланты для 87 пациентов с различными вариантами костных дефектов. Среди них реконструкция дефектов костей черепа выполнена у 46 пациентов, дефектов нижней челюсти и лицевого скелета — у 24 пациентов, длинных трубчатых костей — у 17 больных. Во всех случаях созданные импланты соответствовали анатомическим особенностям пациентов и обеспечивали точное воспроизведение утраченных костных структур.

Метрическая оценка изготовленных имплантов показала высокую степень соответствия проектным параметрам. Среднее отклонение линейных размеров не превышало 0,9 мм, а объемные различия между виртуальной моделью и изготовленным имплантом составили менее 3%. Полученные результаты свидетельствуют о высокой воспроизводимости разработанной технологии.

Отдельно была проведена оценка временных характеристик процесса моделирования. При использовании традиционных методов проектирования средняя продолжительность подготовки индивидуального импланта составляла $6,5 \pm 1,4$ часа. После внедрения разработанного программного комплекса данный показатель сократился до $3,9 \pm 0,8$ часа. Таким образом, применение автоматизированной платформы позволило уменьшить продолжительность предоперационного моделирования в среднем на 35–40%.

Клиническая апробация технологии продемонстрировала значительное повышение эффективности реконструктивных вмешательств. Использование индивидуально спроектированных имплантов обеспечило более точное восстановление анатомии пораженной области и позволило сократить интраоперационные этапы адаптации импланта. Средняя продолжительность оперативных вмешательств уменьшилась на 20–30% по сравнению с традиционными методами реконструкции.

Послеоперационный контроль с использованием МСКТ подтвердил высокую точность позиционирования имплантов. В большинстве наблюдений отклонение от запланированного положения не превышало 1 мм. При этом отмечалось хорошее

соответствие контуров импланта окружающим анатомическим структурам и отсутствие значимых дефектов прилегания.

Анализ клинических результатов показал снижение количества интраоперационных коррекций имплантов, уменьшение продолжительности хирургических вмешательств и повышение качества реконструкции костных дефектов. Полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности разработанного программного комплекса и перспективности его дальнейшего применения в персонализированной реконструктивной хирургии.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что использование автоматизированной платформы для обработки МСКТ-данных и проектирования индивидуальных имплантов позволяет повысить точность моделирования, сократить сроки подготовки к операции и улучшить результаты реконструктивного лечения пациентов с дефектами костных структур.

Обсуждение. Полученные результаты подтверждают высокую перспективность применения технологий трехмерного моделирования и персонализированного проектирования имплантов в современной реконструктивной хирургии. Разработанный программный комплекс продемонстрировал возможность эффективной интеграции данных мультиспиральной компьютерной томографии в единый цифровой цикл предоперационного планирования, что соответствует современным тенденциям развития персонализированной медицины.

В последние годы технологии 3D-моделирования стали важным инструментом реконструктивной хирургии благодаря возможности точного воспроизведения индивидуальных анатомических особенностей пациента. Использование трехмерных моделей позволяет хирургу заранее оценить объем предстоящего вмешательства, выбрать оптимальную хирургическую тактику и минимизировать вероятность интраоперационных ошибок. Вместе с тем большинство существующих программных решений требуют значительного участия специалиста на каждом этапе обработки данных, что увеличивает продолжительность подготовки и ограничивает широкое внедрение данных технологий в повседневную клиническую практику.

Одним из основных преимуществ разработанной платформы является автоматизация процессов сегментации и трехмерной реконструкции. Полученные показатели коэффициента Dice и расстояния Hausdorff свидетельствуют о высокой точности обработки томографических данных и сопоставимы с результатами, представленными в современных зарубежных исследованиях. Это подтверждает возможность использования разработанного алгоритма для создания клинически значимых моделей без существенного снижения качества реконструкции.

Особое значение имеет достигнутое сокращение времени предоперационного моделирования. В условиях современной хирургии скорость подготовки пациента к операции является важным организационным и экономическим фактором. Снижение продолжительности проектирования имплантов более чем на треть позволяет оптимизировать рабочие процессы, ускорить подготовку к реконструктивным вмешательствам и повысить пропускную способность специализированных подразделений.

Проведенная клиническая апробация показала, что использование индивидуально спроектированных имплантов способствует более точному восстановлению анатомических структур и сокращению продолжительности оперативных вмешательств. Уменьшение времени операции имеет не только организационное значение, но и способствует снижению анестезиологического риска,

уменьшению интраоперационной кровопотери и улучшению послеоперационных результатов лечения.

Следует отметить, что наиболее выраженные преимущества персонализированного моделирования были получены при реконструкции сложных дефектов костей черепа и лицевого скелета. В подобных клинических ситуациях стандартные импланты часто не обеспечивают достаточной анатомической точности, тогда как индивидуальный подход позволяет добиться максимального соответствия реконструируемой области естественной анатомии пациента.

Важным аспектом исследования является возможность интеграции разработанной платформы в существующую систему лучевой диагностики. Использование стандартного формата DICOM обеспечивает совместимость с большинством современных компьютерных томографов и медицинских информационных систем. Это создает предпосылки для широкого внедрения технологии в практическое здравоохранение без необходимости существенной модернизации существующей инфраструктуры.

Дополнительный анализ был направлен на изучение соответствия цифровых моделей исходным данным мультиспиральной компьютерной томографии. Для этого проводилось сопоставление геометрических характеристик реконструированных объектов с исходными анатомическими структурами пациентов. Оценивались линейные размеры, объемные параметры, показатели пространственного соответствия и плотностные характеристики тканей.

Установлено, что разработанный программный комплекс обеспечивает высокую воспроизводимость анатомических параметров костных структур. Среднее отклонение между исходными томографическими данными и сформированной трехмерной моделью составило менее 1 мм по всем основным анатомическим ориентирам. Наиболее высокая точность была достигнута при моделировании костей свода черепа и лицевого скелета, где четкость костных контуров на МСКТ обеспечивает оптимальные условия для автоматической сегментации.

Проведенный анализ профилей плотности в единицах Хаунсфилда показал сохранение основных характеристик костной ткани после цифровой обработки изображений. Это подтверждает корректность используемых алгоритмов фильтрации и реконструкции данных и позволяет использовать полученные модели для решения не только геометрических, но и биомеханических задач.

Внедрение разработанной программной платформы позволило оптимизировать процесс взаимодействия между специалистами лучевой диагностики, инженерами медицинского моделирования и хирургами. Использование единой цифровой среды обеспечило сокращение количества промежуточных этапов обработки данных и повысило эффективность подготовки пациентов к реконструктивным вмешательствам.

В ходе исследования установлено, что автоматизация процессов сегментации и проектирования способствует снижению трудозатрат специалистов и уменьшению вероятности субъективных ошибок. При использовании традиционного подхода значительная часть времени затрачивается на ручную обработку изображений и корректировку трехмерных моделей. Разработанная система позволила существенно сократить объем ручных операций и стандартизировать основные этапы подготовки имплантов.

С организационной точки зрения технология обеспечивает возможность формирования единого цифрового архива трехмерных моделей и имплантов, что создает дополнительные условия для накопления клинического опыта и совершенствования алгоритмов реконструкции. Кроме того, использование стандартизированных цифровых

моделей облегчает взаимодействие между медицинскими учреждениями и производителями индивидуальных имплантов.

Предварительная оценка экономической эффективности показала тенденцию к снижению затрат, связанных с повторным моделированием, интраоперационной коррекцией имплантов и увеличением продолжительности хирургических вмешательств. Несмотря на необходимость первоначальных вложений в разработку и внедрение программного комплекса, использование автоматизированной платформы обладает значительным потенциалом для повышения экономической эффективности реконструктивной хирургии в долгосрочной перспективе.

Особый интерес представляла оценка качества моделирования сложных дефектов неправильной формы. В данной группе пациентов применение автоматизированных алгоритмов позволило существенно повысить точность восстановления контуров костных структур по сравнению с традиционными методами ручного моделирования. Полученные результаты имеют важное значение для реконструктивной хирургии, где даже незначительные отклонения формы импланта могут оказывать влияние на функциональный и косметический результат лечения.

Перспективным направлением дальнейшего развития программного комплекса является внедрение технологий искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения. Автоматизированный анализ изображений способен повысить точность сегментации, сократить участие оператора в процессе моделирования и обеспечить дальнейшее ускорение подготовки индивидуальных имплантов. Кроме того, применение нейросетевых алгоритмов открывает возможности прогнозирования оптимальной формы импланта и автоматизированного выбора наиболее эффективных вариантов реконструкции.

Несмотря на полученные положительные результаты, исследование имеет определенные ограничения. Работа выполнена на ограниченной выборке пациентов и охватывает преимущественно дефекты костей черепа, лицевого скелета и длинных трубчатых костей. Для окончательной оценки эффективности разработанной технологии необходимы дальнейшие многоцентровые исследования с расширением спектра клинических наблюдений и длительным анализом послеоперационных результатов.

Таким образом, результаты проведенного исследования подтверждают высокую эффективность автоматизированного 3D-моделирования на основе данных мультиспиральной компьютерной томографии. Разработанный программный комплекс обеспечивает высокую точность реконструкции анатомических структур, сокращает сроки подготовки к хирургическому лечению и способствует дальнейшему развитию персонализированной реконструктивной хирургии.

Заключение. Разработанная программная платформа для автоматизированного 3D-моделирования индивидуальных костных имплантов на основе данных мультиспиральной компьютерной томографии продемонстрировала высокую эффективность при решении задач реконструктивной хирургии. Использование разработанных алгоритмов обеспечивает точную сегментацию костных структур, создание анатомически корректных трехмерных моделей и проектирование персонализированных имплантов.

Применение программного комплекса способствует сокращению времени предоперационного планирования, повышению точности реконструкции костных дефектов и улучшению клинических результатов хирургического лечения. Полученные результаты подтверждают перспективность внедрения технологий

автоматизированного 3D-моделирования в практику современной персонализированной хирургии.

Выводы:

Разработан программный комплекс для автоматизированной обработки данных мультиспиральной компьютерной томографии и создания индивидуальных трехмерных моделей костных структур.

Предложенные алгоритмы сегментации и реконструкции обеспечивают высокую точность моделирования с анатомической погрешностью не более 1 мм.

Использование разработанной платформы позволяет сократить время предоперационного моделирования на 35–40% по сравнению с традиционными методами проектирования имплантов.

Применение индивидуальных имплантов способствует уменьшению продолжительности реконструктивных операций на 20–30% и повышению точности восстановления костных дефектов.

Разработанная технология может быть рекомендована для широкого использования в реконструктивной хирургии и дальнейшего развития персонализированных подходов к лечению пациентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.А., Кондратьев А.Н. Трехмерное моделирование и аддитивные технологии в реконструктивной хирургии // Вестник хирургии. – 2021. – Т. 180, № 4. – С. 74–81.
2. Васильев А.Ю., Трофимова Т.Н. Лучевая диагностика заболеваний костно-суставной системы. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2022. – 512 с.
3. Гайворонский И.В., Ничипорук Г.И. Медицинская визуализация и цифровые технологии в хирургии. – СПб.: СпецЛит, 2021. – 368 с.
4. Каприн А.Д., Ходжибеков М.Х., Хасанов Р.Ш. Современные возможности мультиспиральной компьютерной томографии в хирургической практике // Медицинская визуализация. – 2022. – № 5. – С. 18–27.
5. Трофимова Т.Н., Кармазановский Г.Г. Компьютерная томография в клинической практике. – М.: Видар-М, 2020. – 464 с.
6. Chae M.P., Rozen W.M., McMenamin P.G. et al. Emerging applications of bedside 3D printing in plastic surgery // Frontiers in Surgery. – 2015. – Vol. 2. – Article 25.
7. Ciocca L., Fantini M., De Crescenzo F. et al. CAD/CAM and rapid prototyped scaffold construction for bone regenerative medicine and surgical transfer of virtual planning // Journal of Craniofacial Surgery. – 2011. – Vol. 22, № 2. – P. 750–754.
8. Martelli N., Serrano C., van den Brink H. et al. Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: a systematic review // Surgery. – 2016. – Vol. 159, № 6. – P. 1485–1500.
9. Mitsouras D., Liacouras P., Imanzadeh A. et al. Medical 3D printing for the radiologist // Radiographics. – 2015. – Vol. 35, № 7. – P. 1965–1988.
10. Rengier F., Mehndiratta A., von Tengg-Kobligh H. et al. 3D printing based on imaging data: review of medical applications // International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery. – 2010. – Vol. 5, № 4. – P. 335–341.
11. Ryan J.R., Almefty K.K., Nakaji P. et al. Cerebral aneurysm clipping surgery simulation using patient-specific 3D printing and silicone casting // World Neurosurgery. – 2016. – Vol. 88. – P. 175–181.
12. Tack P., Victor J., Gemmel P., Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review // BioMedical Engineering OnLine. – 2016. – Vol. 15, № 1. – P. 115.

13. Wang J., Zhao Y., Ma C. et al. Application of 3D printing in orthopedic surgery: a review // Journal of Orthopaedic Translation. – 2021. – Vol. 28. – P. 84–95.
14. Wong K.C. 3D-printed patient-specific applications in orthopedics // Orthopedic Research and Reviews. – 2016. – Vol. 8. – P. 57–66.
15. Yang L., Shang X.W., Fan J.N. et al. Application of 3D printing in the surgical planning of complex fractures and orthopedic oncology // Orthopaedic Surgery. – 2020. – Vol. 12, № 3. – P. 741–749.