

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ ПЕРСОНИФИЦИРОВАННОГО ПЯСТНО-ФАЛАНГОВОГО СУСТАВА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ КИСТИ

*А.Н. Николаенко, А.В. Колсанов, Н.В. Попов, В.В. Иванов,
А.Е. Щербовских, П.Ю. Николаев, С.А. Приходько
Самарский государственный медицинский университет, Самара*

После хирургических вмешательств или травм функция кисти должна быть восстановлена максимально, так как для управления сложными современными механизмами требуются точные, строго дозированные движения. Для полного восстановления функциональности кисти требуется максимально точно повторить анатомию утраченных сегментов кисти. Эта задача возможна при использовании 3D-моделирования и аддитивных технологий. Цель работы – разработать персонафицированную 3D-модель пястно-фалангового сустава для последующего воспроизведения в биосовместимом материале. В соответствии с персонафицированной анатомией конкретного пациента, эндопротез пястно-фалангового сустава имеет индивидуально подобранные контуры суставных поверхностей, геометрию соответствующего сегмента кисти и метрические параметры.

Ключевые слова: *пястно-фаланговые суставы, 3D-моделирование, доброкачественные опухоли, аддитивные технологии, КТ, эндопротезы*

Введение

Кисть человека, или дистальная часть верхней конечности, обладает особым значением. С помощью рук и мелкой моторики, движений всех пальцев, люди познают мир и взаимодействуют с ним. Кисть и пальцы – главные инструменты в любой работе. Снижение их функциональности во многом приводит к уменьшению трудоспособности, к ограничению большинства возможностей человека. На современном этапе развития техники и технологий функция кисти должна быть восстановлена максимально, так как для управления сложными механизмами требуются точные, строго дозированные движения [1, 11].

Слаженная и гармоничная работа кисти руки возможна только при сохраненной функ-

циональности всех ее составных частей. Здоровая кисть необходима для полноценной жизни человека, сохранения его трудоспособности.

Изучение строения и функционального значения отдельных частей кисти и их взаимосвязи люди начали в древние времена. Эти исследования в различных вариантах повторяются и углубляются и в наше время.

Общеизвестно, что анатомо-физиологические особенности руки сложились в процессе труда. Ассоциированная с кистями рук область в передней и задней центральных извилинах коры больших полушарий мозга имеет почти такую же протяженность, как и все остальное тело. Это не удивительно, если помнить, что во всех видах многообразной человеческой деятельности и повседневной жизни главная роль принадлежит кисти.

Кисть выполняет статическую, динамическую и сенсорную функции. Функция кисти складывается из трех элементов. Вытянутая вперед рука, открытая, с прямыми пальцами служит лопатой, совком; согнутые пальцы – крючком, щипцами. Кисть является посредником человека в соприкосновении с внешним миром. Кисть – это орган труда во всем многообразии профессий. Она выполняет волю человека в механических актах и в психических переживаниях. Кисть – орган осязания; у слепых – орган зрения, у немых – орган речи. Даже сравнительно небольшая утрата функции кисти трагична. Гибнет непревзойденный инструмент. Но при этом теряется нечто большее: переводятся в тупик созидательные отделы мозга.

Для полного восстановления функциональности кисти после хирургических вмешательств или травм требуется максимально точно повторить анатомию утраченных сегментов кисти.

Решение этой амбициозной задачи возможно при использовании 3D-моделирования и аддитивных технологий [2].

Аддитивное производство – процесс соединения материалов и выращивания объектов по 3D-модели, как правило, слой за слоем. Зачастую его появление соотносят с индустриальным производством, в то время как свой “бум” оно пережило в эпоху развития цифровых технологий [3, 5].

В 2015 г. аддитивное производство начало набирать обороты и в медицинской сфере. Отчасти это связано с открытиями, совершенными в последние годы, крупными инвестициями и появлением новых передовых технологий. В 2015 г. аддитивные технологии пережили расцвет в разных отраслях медицины. Ее главная заслуга заключается в массовой индивидуализации, например, в возможности изготовления хирургических имплантатов по параметрам тела пациента. Впервые в истории хирурги научились изготавливать такие имплантаты, которые встают как влитые и почти не причиняют пациенту неприятных ощущений [4, 7].

Очевидно, что за этой технологией будущее, когда начнется массовая установка имплантатов, способных подстраиваться под движения тела в отличие от стандартных имплантатов, которые встают криво и причиняют боль. Эти имплантаты помогут пациентам бы-

стрее восстановиться и вернуться к привычной жизни.

Цель работы – разработать персонализированную 3D-модель пястно-фалангового сустава кисти руки для последующего воспроизведения в материале.

Материал и методы

Пястно-фаланговые суставы образованы головками пястных костей и основаниями проксимальных фаланг пальцев. Все эти суставы имеют шаровидную форму и, соответственно, три взаимно перпендикулярные оси вращения, вокруг которых происходят сгибание и разгибание, приведение и отведение, а также круговое движение. Сгибание и разгибание возможны на 90–100°, отведение и приведение – на 45–50°. Пястно-фаланговые суставы укреплены коллатеральными связками, расположенными по бокам от них. С ладонной стороны капсулы этих суставов имеют добавочные связки, именуемые ладонными. Волокна их переплетаются с волокнами глубокой поперечной пястной связки, которая препятствует расхождению головок пястных костей в стороны.

Повторение точных и дозированных движений кисти, сложной биомеханики пястно-фаланговых суставов возможно только при повторении индивидуальной анатомии коротких трубчатых костей, составляющих пястно-фаланговый сустав.

Изготовление индивидуальных эндопротезов на основании обзорной рентгенографии кисти не решает значительную часть задачи адекватного эндопротезирования, т.к. именно разрешающая возможность метода рентгенографии не позволяет учесть индивидуальный контур замещаемой кости и кривизну суставной поверхности, что крайне важно в формировании эндопротеза [9, 10].

Использование цифровых 3D-технологий, CAD/CAM-технологий проектирования и производства позволяет решить вопросы персонализации получаемых 3D-моделей эндопротезов пястно-фаланговых суставов [6, 12].

Разработка цифровых 3D-моделей ведется совместно врачом-хирургом и 3D-моделлером [8].

Рассмотрим процесс проектирования эндопротеза поэтапно.

Первый этап включает в себя получение и обработку DICOM файла и далее конвертация в

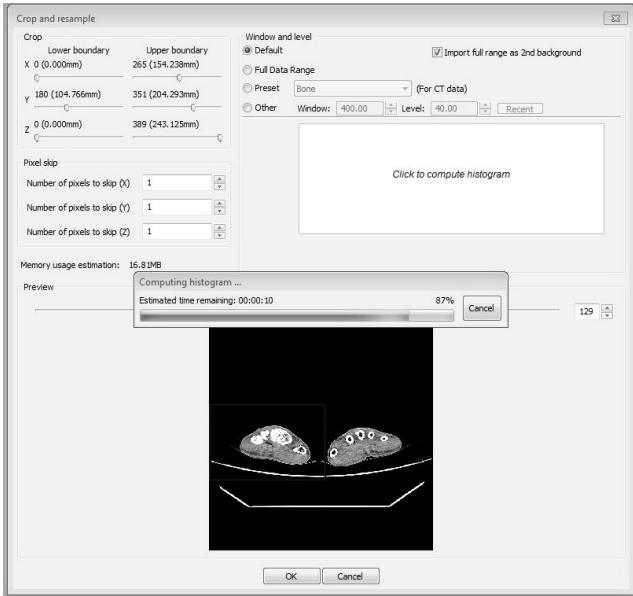


Рис. 1. Диалоговое окно импорта DICOM-данных и настроек

полигональную модель в .stl-формате. Для создания 3D-модели используется программный комплекс ScanIP.

Шаг 1 – в рабочее пространство ScanIP импортируется массив данных формата DICOM в виде последовательных монохромных изображений рентгеновской КТ кисти пациента. Для оптимальной работы с полученными данными производится настройка контрастности и резкости изображений, а также выделяется область необходимого участка для 3D-реконструкции (рис. 1).

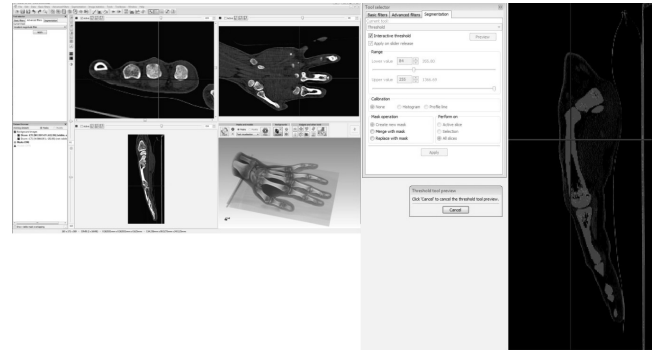


Рис. 2. Сегментация изображений инструментом Threshold

Шаг 2 – фильтрация компьютерных томограмм. Инструмент Median filter помогает убрать шум с изображения (“пятнистость”) без искажения большого числа деталей.

Шаг 3 – первоначальная сегментация (создание “маски”) и ручная доводка. Инструментом Threshold создается “маска” с использованием узкого диапазона по серой шкале, чтобы исключить включение в сегментацию мягких тканей (рис. 2).

Для коррекции полученной “маски” используется инструмент: Paint with threshold. В ручном режиме очищаются ненужные области, оставляя необходимый участок, в данном случае необходимый для эндопротезирования сегмент кисти (рис. 3).

Шаг 4 – заполнение небольших отверстий в сегментации и сглаживание полученной “маски”. Morphological close filter – инструмент, который используется для заполнения отвер-

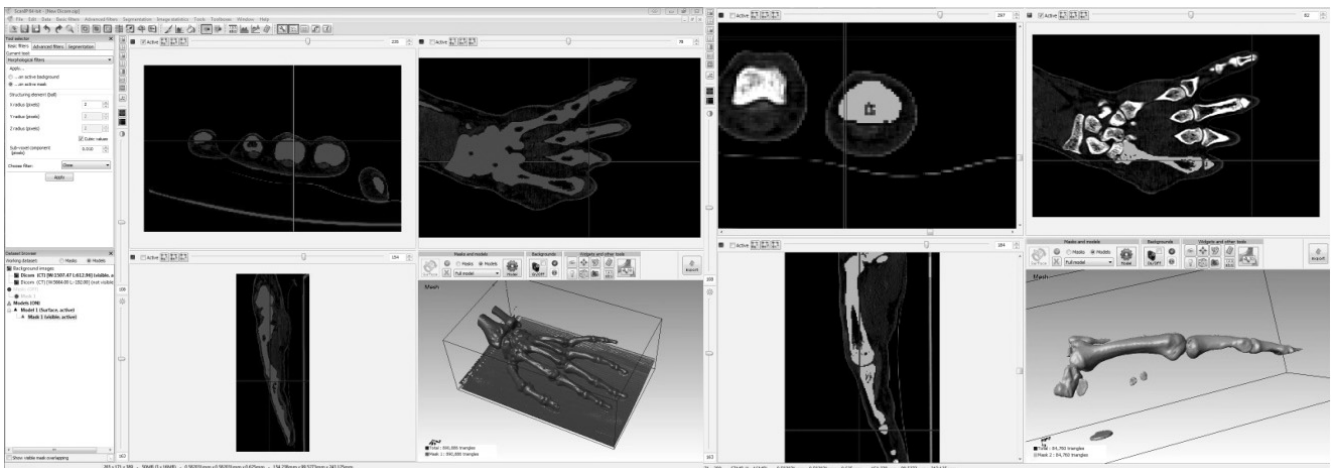


Рис. 3. Использование инструмента Paint with threshold

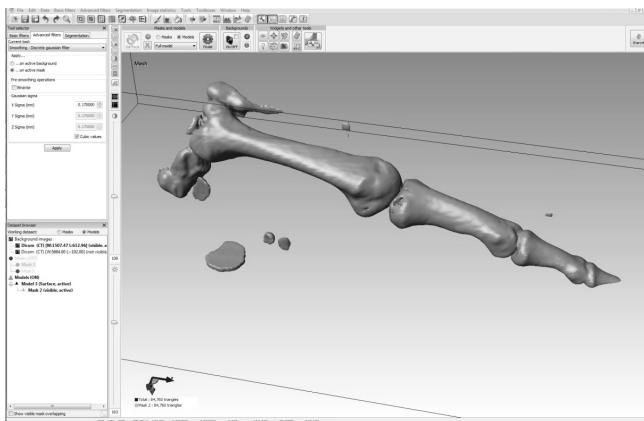


Рис. 4. 3D-модель пястно-фалангового сустава, полученная при обработке DICOM-данных компьютерной томографии кисти

ствий. И, наконец, применяются инструменты для сглаживания модели (например, Recursive Gaussian), чтобы выровнять поверхность “маски”.

Шаг 5 – создание 3D-модели. Полученная “маска” конвертируется в трехмерную модель, которая представляет собой облако точек и вектор конфигурации, описывающий форму анатомической структуры пястно-фалангового сустава (рис. 4).

Шаг 6 – экспортирование полученной модели в .stl-формат для дальнейшей обработки.

Второй этап – удаление артефактов и разделение 3D-модели пястно-фалангового сустава на составные объекты: пястную кость, основную фалангу и полость трубчатых костей (рис. 5). Для этих целей используются программные комплексы Artec Studio 9 (удаление артефактов, импорт в промежуточный формат .obj) и ZBrush 4R6 (разделение на составляющие объекты, ретопология сетки).

Также на этом этапе намечаются основные параметры будущего персонифицированного пястно-фалангового сустава кисти: точки и плоскости сегментарной резекции суставных поверхностей, длина и ширина ножки эндопротеза в соответствии с параметрами костно-мозгового канала, индивидуальные контуры суставных поверхностей, намечаются будущие индивидуальные точки крепления сухожилий, суставной капсулы и их количество в соответствии с медико-техническим заданием оперирующего хирурга.

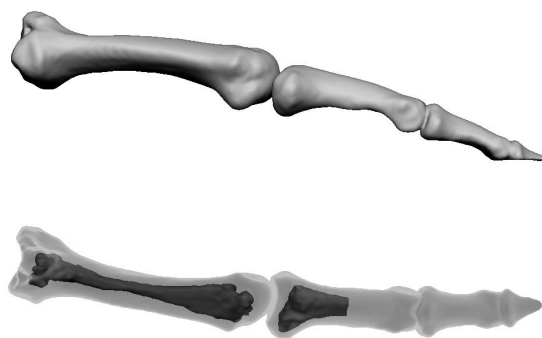


Рис. 5. 3D-модель пястно-фалангового сустава, разделенная на составные объекты

Третий этап – создание цифровых 3D моделей персонифицированных пястно-фалангового сустава.

Для работы на данном этапе используются программы и пакеты для 3D-моделирования: 3ds Max2012-полигональное моделирование; ZBrush 4R6-высокополигональное моделирование, 3d-скульптинг. На основе этих методик компьютерного моделирования, создается индивидуальный персонифицированный 3D-эндопротез сустава кисти. Задача стоит в том, чтобы максимально точно передать анатомические особенности сустава кисти пациента, его антропометрические и биомеханические параметры, а, следовательно, и геометрические параметры будущего имплантата. Поэтому качество 3D-модели, полученной после обработки данных компьютерной томографии, крайне важно (рис. 6).

Создание геометрического (трехмерного) образа имплантата, т.е. конструктивного каркаса его поверхности, который соответствовал

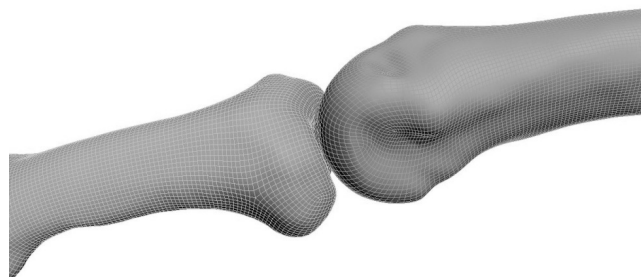


Рис. 6. Имортируемая модель сустава в программный комплекс 3ds Max2012

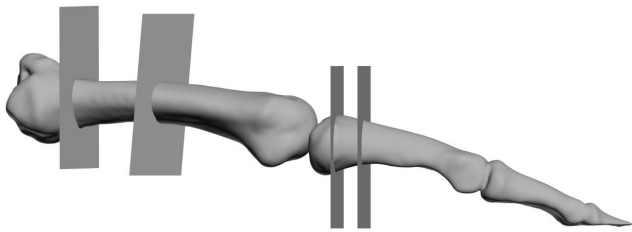


Рис. 7. Плоскости будущих опилов и ножек эндопротеза

бы геометрическим параметрам пястно-фалангового сустава кисти и требованиям технологического процесса изготовления (селективное лазерное спекание), рассмотрим пошагово.

Шаг 1 – в программный комплекс 3ds Max2012 импортируются модели сустава кисти, полученные при выполнении компьютерной томографии кисти пациента. В рабочей среде 3D-редактора модели сустава представляются в виде полигональной сетки (объект состоит из точек, точки соединены ребрами, ребра образуют треугольники) (рис. 6).

Шаг 2 – создаются секущие плоскости в местах резекций и в местах для определения длин “ножек” (все параметры подбираются индивидуально совместно с врачом-хирургом). Ножка эндопротеза вводится в канал кости, представляя собой тело вращения (например, цилиндр), параметры которого подбираются индивидуально на основании размеров, положения и формы костномозгового канала (рис. 7).

Шаг 3 – отсекаются и удаляются лишние элементы сетки модели сустава. Моделируются ножки костно-мозговых каналов (рис. 8).

Шаг 4 – моделируются точки крепления мышц, сухожилий и суставной капсулы и их расположение. Точка крепления создается в виде ложа для хода хирургической иглы и перемычки для фиксации сухожилия хирургической нитью. Расположение точек фиксации на поверхности 3D-модели сустава выполняется по рекомендациям анатомического атласа и врача-хирурга.

На суставной поверхности головки пястной кости и суставной поверхности основания основной фаланги имеются по четыре точки крепления для фиксации коллатеральных связок, образующих пястно-фаланговый сустав. В проксимальной части пястной кости имеются две точки фиксации для крепления червеобразных и межкостных мышц. Так как они крепятся

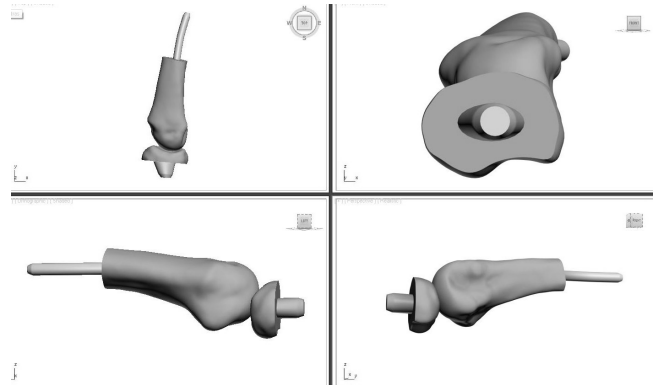


Рис. 8. Предварительная модель эндопротеза, созданная с заданными геометрическими параметрами, на основании технического задания

к пястной кости широким основанием, для них предусмотрены соответствующие точки крепления.

В местах точек крепления создаются дополнительные (вспомогательные) объекты, по геометрическим параметрам соответствующие расположению точек. После чего, с использованием инструмента ProBoolean вычитаются вспомогательные объекты из тела импланта (рис. 9).

Шаг 5 – моделируются ложе и перемычки для каждой точки крепления, путем использования инструментария и возможностей 3D-редактора, после чего создается единая модель персонифицированного пястно-фалангового сустава кисти (рис. 10).

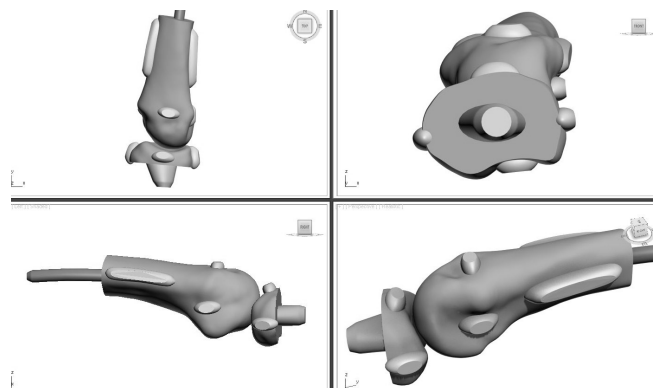


Рис. 9. Вспомогательные объекты в местах будущих точек крепления

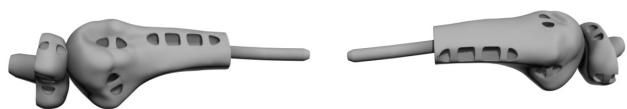


Рис. 10. 3D-модель эндопротеза пястно-фалангового сустава

Результаты

В соответствии с персонифицированной анатомией конкретного пациента, эндопротез пястно-фалангового сустава имеет индивидуально подобранные контуры суставных поверхностей, геометрию соответствующего сегмента кисти и метрические параметры. В дистальном отделе пястной кости имеются индивидуальные точки крепления коллатеральных связок пястно-фалангового сустава, образующих суставную капсулу. В проксимальной части пястной кости имеются индивидуальные точки крепления червеобразных и межкостных мышц. Основание проксимальной фаланги имеет соответствующие точки крепления связочного аппарата, образующего капсулу пястно-фалангового сустава. Все перечисленные выше анатомические структуры играют важнейшую роль в формировании мелкой моторики кисти и строго дозированных движений.

Вывод

Разработана 3D-модель пястно-фалангового сустава для последующего воспроизведения на 3D-принтере с помощью аддитивных технологий. Описанная технология позволяет производить эндопротезы пястно-фаланговых суставов кисти с учетом индивидуальной анатомии конкретного пациента, замещать пострезекционные и посттравматические дефекты кисти любой протяженности, в короткие сроки восстанавливать утраченную функцию в полном объеме за счет полного повторения анатомии удаленного сегмента кости, подбирать индивидуальные точки крепления мышц и сухожилий, тем самым восстанавливать мелкую моторику кисти.

Список литературы

1. Алиев М.Д., Полякова В.Г., Менткевич, Г.Л., Маякова С.А. Детская онкология. Национальное руководство. – М.: Издатель-
2. Баева Л.С., Маринин А.А. Современные технологии аддитивного изготовления объектов // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. № 1. С. 7–12.
3. Василюк В.П., Штраубе Г.И., Четвертных В.А. Использование аддитивных технологий при восстановлении дефектов лицевого скелета // Пермский мед. журнал. 2013. Т. 30. №3. С. 60–65.
4. Гаврюшин С.С., Хрыков С.С. Использование аддитивных технологий в процессе подготовки и проведения высокотехнологичных хирургических операций аддитивные технологии в российской промышленности // В сб. докладов научно-практической конференции “Аддитивные технологии в российской промышленности”. – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. 2015. С. 3.
5. Гатитулин М.Н., Башарин И.А. Ротационное измельчение порошков для аддитивных технологий и порошковой металлургии // Вестник современной науки. 2015. Т. 1. № 1. С. 26–33.
6. Диков Ю.Ю., Соболевский В.А., Кропотов М.А., Ивашков В.Ю. Трехмерное моделирование с использованием 3D-печати при реконструктивных операциях на нижней челюсти // Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи. 2015. № 1. С. 50–54.
7. Ипполитов Е.В., Новиков М.М., Новикова Л.В. Лазерно-информационные аддитивные технологии в медицине // В сб. материалов международной конференции “Новые информационные технологии в медицине, биологии, фармакологии и экологии”. Под ред. Глориозова Е.Л. – М.: ООО “Институт новых информационных технологий”. 2016. С. 38–47.
8. Карпов О.Э., Гаврюшин С.С., Замятин М.Н. и соавт. Цифровые технологии в современной реконструктивной хирургии // Вестник Нац. медико-хирургического центра им. Н.И. Пирогова. 2016. Т. 11. № 2. С. 3–8.
9. Колсанов А. В., Байриков И. М., Попов Н. В. и соавт. Изготовление индивидуального экзопротеза носа методом цифрового прототипирования // Управление качеством мед. помощи. 2013. № 2. С. 9–14.
10. Котельников Г.П., Орлов А.Е., Стадлер В.В. и соавт. Опыт эндопротезирования крупных

- суставов при опухолях костей в Самарской области // Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи. 2016. № 2. С. 11–15.
11. Миронов С.П., Котельников Г.П. Ортопедия: национальное руководство. – М.: ГЭОТАР-Медиа. 2012. 872 с.
12. Саакян М.А. Возможности компьютерной томографии в диагностике опухолей опорно-двигательного аппарата // Бюллетень медицинских интернет-конференций. 2013. Т. 3. № 3. 811 с.

DEVELOPMENT OF 3D-MODELS OF DIGITAL PERSONALIZED METACARPOPHALANGEAL JOINT ON THE BASIS OF COMPUTER TOMOGRAPHY BRUSH

*A.N. Nikolaenko, A.V. Kolsanov, N.V. Popov, V.V. Ivanov,
A.E. Shcherbovskih, P.Yu. Nikolaev, S.A. Prihodko
Samara State Medical University, Samara, Russia*

At the present stage of technological development wrist function should be restored as much as possible, as for the management of complex mechanisms require precise movement is strictly metered. To fully restore the functionality of the hand after surgery or injury is required maximally accurately replicate the anatomy of the hand of the lost segments. This task is possible using 3D-modeling and additive technologies. Purpose is to develop a personalized 3D-model of the metacarpophalangeal joint for later playback in the material. In accordance with the personalized anatomy of a particular patient, endoprosthesis of metacarpophalangeal joint is tailor-made contours of the joint surfaces, the geometry of the corresponding wrist segment metric parameters.

Key words: *metacarpophalangeal joints, 3D-modeling, benign tumors, additive technology, CT, implants*

E-mail: nikolaenko.83@inbox.ru