

ББК 56.6
УДК 616.31-089
С 21

Сафонов А.А. Применение трехмерных компьютерных технологий в хирургической стоматологии и челюстно-лицевой хирургии: учебное пособие. – СПб.: Человек, 2015. – 44 с.

Автор:

Сафонов Андрей Александрович – кандидат медицинских наук, ассистент кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии им. А.А. Лимберга СЗГМУ им. И.И. Мечникова

Рецензент:

Кудрявцева Татьяна Дмитриевна – кандидат медицинских наук, доцент кафедры детской стоматологии СЗГМУ им. И.И. Мечникова

В данном учебном пособии даётся обзор современных методик получения трехмерных изображений структур челюстно-лицевой области, а также их последующей обработки для планирования хирургических операций. Кроме того, представлены общие принципы моделирования вспомогательных устройств – шаблонов, которые используются для проведения операций по разработанному на компьютере плану. Также рассмотрены технологии получения индивидуальных эндопротезов.

Утверждено
в качестве учебного пособия
Методическим советом ГБОУ ВПО СЗГМУ им. И.И. Мечникова,
протокол №4 от 4 декабря 2015 г.

Издательство ООО «Человек»
Санкт-Петербург, Малый пр. В.О., 26, оф. 2.
Подписано в печать 10.12.2015. Формат 60×90/16.
Гарнитура Ариал. Усл. печ. л. 2,75. Тираж 500 экз.
Отпечатано в типографии «Артемиды».

ISBN 978-5-93339-321-4

© А.А. Сафонов, 2015
© Издательство «Человек», 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Трехмерные изображения тканей челюстно-лицевой области	5
1.1. Получение трехмерного изображения тканей челюстно-лицевой области	5
1.2. Виды цифровых данных, получаемых при неинвазивных медицинских исследованиях строения тела человека.....	10
1.3. Способы формирования зрительных образов на основе данных трехмерного сканирования.....	11
Глава 2. Обработка результатов трехмерного сканирования	16
2.1. Получение виртуальных объектов.....	16
2.2. Упрощение трехмерных моделей и подготовка к численным способам симуляции физических процессов... ..	17
2.3. Программные комплексы для визуализации, сегментации и симуляции лечения	19
Глава 3. Применение результатов трехмерного сканирования челюстно-лицевой области	21
3.1. Проектирование хирургических шаблонов для дентальной имплантации.....	21
3.2. Проектирование шаблонов для костно-реконструктивных операций в челюстно-лицевой области	29
3.3. Проектирование эндопротезов костей лицевого отдела черепа.....	33
Заключение.....	39
Тестовые задания к учебному пособию	40
Правильные ответы на тестовые задания.....	43
Рекомендуемая литература.....	44

ВВЕДЕНИЕ

Восстановительное лечение больных с потерей зубов, дефектами и деформациями челюстно-лицевой области является одной из самых сложных и неизменно актуальных проблем медицины. В последние годы появились новые способы реконструкции зубных рядов и костей лицевого отдела черепа с использованием компьютерного планирования предполагаемой операции, а также изготовления вспомогательных устройств и индивидуальных эндопротезов. Для проведения такого планирования необходимо последовательно выполнить следующие этапы:

1. получить трехмерное изображение тканей челюстно-лицевой области;
2. обработать полученные данные с помощью специализированных компьютерных программ, проведя точную топическую диагностику, виртуальную остеотомию, компьютерное моделирование шаблонов и протезов;
3. изготовить хирургические шаблоны и индивидуальные протезы.

Выполнение реконструктивных операций по заранее разработанному плану с использованием вспомогательных устройств – шаблонов, а также применение индивидуальных протезов позволяют сократить время операции и способствуют получению ожидаемого функционального и эстетического результатов лечения.

ГЛАВА 1. ТРЕХМЕРНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ТКАНЕЙ ЧЕЛЮСТНО-ЛИЦЕВОЙ ОБЛАСТИ

1.1. Получение трехмерного изображения тканей челюстно-лицевой области

В настоящее время для получения изображений частей организма человека используют неинвазивные способы. В основном применяют звуковые волны, главным образом ультразвук, электромагнитное излучение различных диапазонов, в том числе рентгеновское излучение, инфракрасный и видимый свет, постоянное и переменное электромагнитное поле, элементарные частицы, излучаемые радиоактивными изотопами.

Для получения трехмерного представления исследуемого объекта необходимо получить данные об изменении физических характеристик пространства в каждой точке исследуемого объема. При проведении ультразвукового сканирования регистрируют отражённое излучение, возникающее на границе изменения плотности среды. При проведении светового сканирования и конфокальной трехмерной микроскопии регистрируют отражённый свет. Магнитно-резонансная томография и позитронно-эмиссионная томография основаны на регистрации квантов, выделение которых при МРТ происходит во время релаксации предварительно возбужденных магнитным полем протонов, а в случае ПЭТ – при аннигиляции позитронов, образующихся при бета-распаде радионуклида, входящего в состав радиофармпрепарата, с электронами. Компьютерная томография основана на регистрации остаточного после прохождения через исследуемый объект рентгеновского излучения.

Для сбора и обработки информации используют компьютеры. Для этого электрические импульсы датчиков сканирующих устройств преобразуются в цифровые данные. После этого они могут быть сохранены на микросхемах памяти или накопителях, обработаны программами, визуализированы.

Поскольку каждый способ имеет свою физическую специфику получения данных, в клинических исследованиях челюстно-лицевой области нашли применение следующие методы: рентгеновская компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, световое сканирование поверхности.

Существует 3 вида рентгеновской компьютерной томографии: пошаговая, мультиспиральная и конусно-лучевая. Методика позволяет провести диагностику и трехмерную реконструкцию костных структур, эмали и дентина зубов, пломбировочных материалов, улитки внутреннего уха, воздухонаполнение верхних дыхательных путей. Кроме того, в данных мультиспиральной КТ хорошо дифференцируются мышцы, жировая ткань, крупные сосуды, слюнные железы, воспалительные и опухолевые инфильтраты, кисты мягких тканей. При внутривенном контрастировании хорошо выделяются сосуды и богато васкуляризированные ткани, возможно отличить инфильтрат от полости с рентгеновски плотным содержимым. По данным А.Ю. Васильева, благодаря отображению почти всех тканей челюстно-лицевой области метод имеет наибольшую значимость с стоматологии и челюстно-лицевой хирургии. В настоящее время применяют 2 типа компьютерных томографов: мультиспиральные и конусно-лучевые. В первом случае остаточное рентгеновское излучение, формируемое в виде «веера» рентгеновской трубкой и коллиматором, регистрируется полупроводниковыми или газоразрядными детекторами. Собранные данные представляют собой ряды точек, получаемые при непрерывном вращении и одновременном поступательном движении трубки и детекторов. При конусно-лучевом сканировании, также известном как 3D дентальная томография или 3D КТ, датчик представляет собой матрицу детекторов размером до 800×800 точек. В процессе исследования получают множество изображений-проекций под множеством углов, охватывающих 1 полный оборот. При этом рентгеновский луч формируют в виде конуса. Математические алгоритмы получения трехмерных данных, так называемой реконструкции объема, также сильно различаются. В связи с этим при КЛКТ, наряду с хорошо детализированным отображением костей, зубов, металлических и прочих рентгеноконтрастных объектов, плохо дифференцируется изображение мягких тканей, тогда как размер элемента изображения достигает 75 микрон по всем 3 осям. При МСКТ достаточно хорошо визуализируются все структуры ЧЛО, однако минимальный размер элемента изображения, как правило, не бывает меньше 325 микрон (рис. 1). Для определения оптимального метода исследования ЧЛО можно воспользоваться таблицей 1. Следует добавить, что хорошая детализация изображений при КЛКТ частично нивелируется большим количеством цифровых шумов. Из приведенной таблицы следует, что для проведения диагностики заболеваний челюстей и зубов хорошо подходит КЛКТ, однако если требуется диагностика мягкотканых образо-

ваний либо трехмерная модель структур ЧЛО, необходимо выполнять МСКТ. По данным М.В. Пиневской с соавторами, лучевая нагрузка при выполнении ортопантомографии, КЛКТ и МСКТ будет одинаковой и равна 40 мкЗв, что сопоставимо с дозой, получаемой при трехчасовом перелете на самолете.

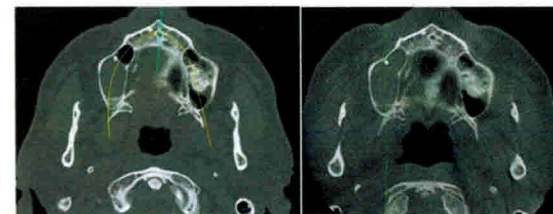


Рис. 1. Сравнение результатов МСКТ (слева) и КЛКТ (справа) одного и того же пациента

Таблица 1.

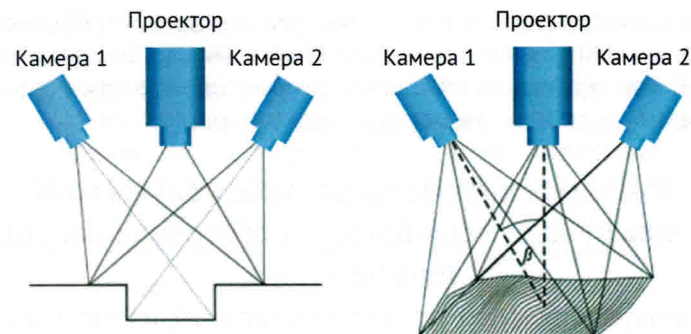
Сравнение свойств изображений тканей челюстно-лицевой области при применении МСКТ и КЛКТ

Критерий	МСКТ	КЛКТ
Размер элемента изображения	не менее 0,34 мм	достигает 0,075 мм
Количество шумов в изображении	меньше	больше
Качество трехмерной реконструкции в автоматическом режиме	хорошее	содержит большое количество искажений и шумов
Величина артефактов от металлов	только в срезах с металлическим объектом	в срезах с металлическим объектом и в соседних срезах, что связано с конусной формой пучка рентгеновского излучения
Дифференцировка мягкотканых структур	хорошая	очень слабая или отсутствует

Метод магнитно-резонансной томографии позволяет изучить структуру мягких тканей ЧЛО. Костная ткань, особенно кортикальная,

Световое сканирование поверхности позволяет получить трехмерную виртуальную поверхность зуба, зубного ряда, лица, гипсовых моделей челюстей. Сканирование светом проводят по двум основным методикам.

Вторая методика сканирования поверхности называется конфокальная микроскопия. Суть способа заключается в получении четкого изображения на датчике только в местах точного попадания точек поверхности объекта в плоскость фокуса объектива (рис. 3).



1. *Journal of the American Medical Association*, 1997; 277: 1039-1043.

Точный

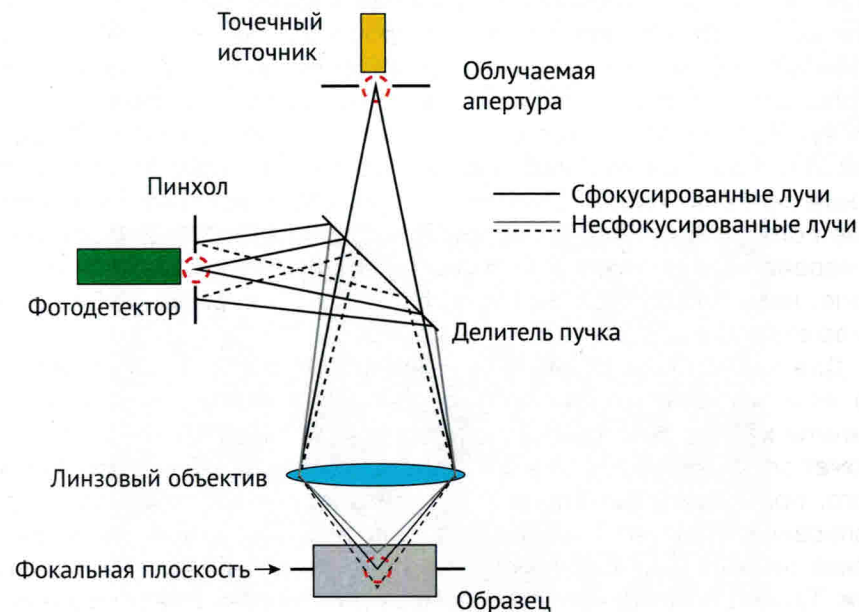


Рис. 3. Схема конфокального микроскопа

Для создания хирургического шаблона, как правило, выполняют следующие шаги.

Получение и загрузка данных МСКТ либо КЛКТ, геометрической модели скана гипсовой модели. Полученные при рентгеновском исследовании данные обычно записаны на компакт-диске и находятся в папках DICOM, либо Data и представляют собой один или серию файлов в формате Dicom с расширением .dcm. Этот формат данных является универсальным для различных моделей сканирующих устройств. В заголовке он содержит полную информацию об исследовании, включая дату, личные данные пациента, данные учреждения, где проводили исследование, напряжение на рентгеновской трубке и экспозицию, описание координат зоны исследования и размеры вокселя (рис. 17). В области данных находится последовательность чисел, соответствующих рентгеновской плотности точек среза. Таким образом, файл Dicom несет информацию о скалярном поле области исследования. В назубном или назубно-десневом шаблоне опорная поверхность повторяет рельеф зубного ряда или слизистой. Однако при рентгеновском сканировании возникают неизбежные артефакты при отображении рядом находящихся структур с сильно отличающейся рентгеновской плотностью. Эти артефакты выглядят как лучи с повышенной или резко сниженной плотностью. Кроме того, поверхность слизистой полости рта на рентгеновской томографии в общем случае не дифференцируется. Для того, чтобы устранить эти дефекты, необходимо получить файл оптического скана гипсовой модели либо файл скана зубного ряда, полученный с помощью интраорального сканера в формате .stl. В программе для моделировки шаблона необходимо совместить скан поверхности зубов и данные КТ. Для этого проводят так называемую регистрацию. Она заключается в совмещении минимум трёх максимально удалённых друг от друга точек, хорошо определяемых как на скане поверхности полости рта, так и на рентгеновском отображении. Обычно это вершины бугорков зубов. При отсутствии надёжной регистрации по зубам прибегают к другим способам. В системе Nobel Clinician и Implant-Assistant регистрируют 2 томографических изображения: пациента с установленным съёмным пластмассовым протезом и одного съёмного протеза. Для этого в съёмный протез внедряют рентгеноконтрастные метки из гуттаперчевых штифтов. При этом хирургический шаблон моделируется на основе КТ-скана съёмного протеза. В системе Implant Studio 3 share для получения отображения постановки зубов и рельефа слизистой используют рентген-

контрастную индивидуальную ложку, которая во время проведения компьютерной томографии должна быть установлена в правильном положении. В программе регистрация скана гипсовой модели пациента идет по отображению внутренней поверхности индивидуальной ложки. При создании назубного или надесневого шаблона правильная регистрация съёмного протеза или индивидуальной ложки является критическим этапом, от которого зависит точность расположения имплантатов в челюсти.

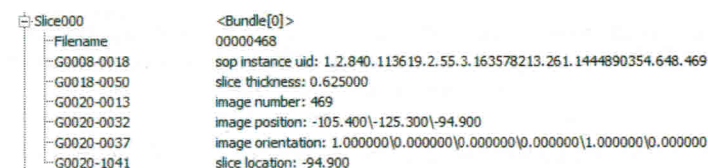


Рис. 17. Заголовок файла Dicom с 1 срезом

Диагностика состояния костной ткани. Полученные данные рассматривают на предмет наличия инородных тел в кости, очагов деструкции, определяют состояние пародонта зубов, определяют состояние слизистой верхнечелюстной пазухи и естественных соустьев с полостью носа.

Изучение строения альвеолярного отростка или альвеолярной части челюсти с проведением измерений его высоты и ширины. Эти данные необходимы для быстрого подбора максимального размера имплантатов. При этом учитывают, что минимальная толщина кости вокруг имплантата должна составлять 1 мм. Для предотвращения повреждения нижнеальвеолярного нерва расстояние от верхушки имплантата до нижнечелюстного канала планируют не менее чем 1,5 мм, что связано с остроконечной формой фрез для подготовки имплантационного ложа. То же касается и отношения с дном верхнечелюстной пазухи (рис. 18, а).

Расстановка имплантатов. На этом этапе врач имеет возможность моделировать необходимое положение имплантата и может контролировать его оптимальное положение в альвеолярном отростке. Оптимальным положением в общем случае является соблюдение минимальной толщины кости вокруг имплантата, а также совпадение его оси с осью отсутствующего зуба. Для изготовления эстетичной реставрации на имплантате необходимо разместить выход ортопедического соединения из кости в область небной части шейки будущего искусственного зуба (рис. 18, б, в).

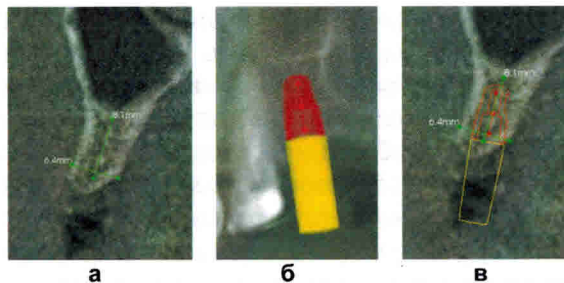


Рис. 18. а – измерение альвеолярного отростка в месте предполагаемой установки имплантата; б, в – примерка виртуального имплантата с прямым абатментом

Проектирование шаблона. В разных системах эта задача решается по-разному. В системе Nobel Clinician проектирование осуществляет оператор компании поставщика программного обеспечения. Готовый проект для согласования по электронным каналам поступает к врачу. В других системах проектирование происходит в автоматическом или полуавтоматическом режиме на стороне врача. В универсальных системах Blue Sky Plan, Implant Studio и некоторых других программа предлагает выбрать путь введения шаблона, исключая поднутрения, внутренний диаметр, высоту и положение втулки шаблона, толщину его опорной поверхности, а также расположение и характеристики дополнительных удерживающих гвоздей или пинов. На выходе получают трехмерную модель шаблона для трехмерной печати, а также модели металлических втулок. В системе R2Gate можно воспользоваться проектированием и изготовлением как на стороне поставщика, так и собственными средствами. Для этого компания на основе расстановки имплантатов и скана модели создает трехмерную модель, которая включает в себя рельеф челюсти и специальные штифты, повторяющие внутренние контуры втулки. Полученную модель можно распечатать и изготовить шаблон из быстротвердеющей пластмассы, либо средствами CAD путем обжимки создать трехмерную модель шаблона.

Изготовление шаблона. Nobel Biocare берет эту часть работы на себя. Готовый шаблон состоит из пластмассовой каппы с вклеенными титановыми втулками. В случае получения трехмерной модели изготовить шаблон можно в современной зуботехнической лаборатории. Для изготовления пластмассовых частей шаблонов применяют лазерную стереолитографию. Эта технология позволяет получить пластиковую копию трехмерной модели. В настоящее время точность

метода составляет 40 микрон. Для изготовления металлических втулок используют фрезерование или лазерное спекание частиц кобальтохромового сплава. Приготовленные пластмассовые шаблоны перед применением подлежат холодной стерилизации, предпочтительным способом является стерилизация в аппаратах Sterrad – низкотемпературных плазменных стерилизаторах. Стоит отметить, что пластмассовые шаблоны могут деформироваться и разрушаться под действием ультрафиолетового излучения, а также чувствительны к влажности. В своей практике мы применяли также назубные шаблоны, полученные методом лазерного спекания частиц кобальтохромового сплава. Точность такого способа печати составляет 40 микрон, минимальная толщина базиса шаблона – 0,4 мм, втулки под пилотное сверло диаметром 2 мм являются частью монолитной конструкции, и исключаются погрешности вклейки металлической втулки в пластмассовый базис. Кроме того, металлический шаблон необходимо стерилизовать в автоклаве, что полностью исключает риск инфицирования имплантационного ложа. Металлический шаблон не деформируется с течением времени и не требует специальной среды для его хранения (рис. 19).



Рис. 19. Назубный хирургический шаблон из кобальтохромового сплава, изготовленный способом лазерного спекания

Как упоминалось ранее, при изготовлении хирургических шаблонов для имплантации в беззубую челюсть критически важным является момент совмещения информации о рельефе слизистой и подлежащих костных структур. При этом возможны ошибки на этапах снятия оттиска, отливки модели, при изготовлении съемного протеза или индивидуальной ложки, при позиционировании протеза или ложки во рту при рентгеновском исследовании, неточная регистрация поверхностей. Кроме того, при большой подвижности слизистой возможно смещение хирургического шаблона в момент его фиксации на челюсти. При этом взаимное расположение имплантатов может сохраняться, и проблем фиксации заранее изготовленной ортопедической конструкции

не будет. Однако положение имплантатов в челюсти может значительно отличаться от запланированного. Это обстоятельство особенно важно в случаях ограниченного объема кости, когда используются имплантаты минимально возможного диаметра.

Для устранения подобного рода ошибок при протезировании беззубых челюстей, а также при одномоментном удалении всех зубов с челюсти и одномоментной имплантации, целесообразно использовать наkostный хирургический шаблон. При этом исключаются промежуточные моменты совмещения изображений, полученных разными способами, а также ошибки позиционирования шаблона. Для изготовления наkostного шаблона достаточно выполнить рентгеновскую компьютерную томографию, при этом для выяснения конструктивной постановки зубов можно использовать рентгеноконтрастные каппы, либо на существующем съемном протезе проточить канавки вокруг шеек зубов и заполнить их композитным пломбировочным материалом. В программах Amira, 3DDoctor, Mimics, либо Inobitec DICOM-просмотрщик выполняется сегментация челюстей, зубов, нижнечелюстных каналов, протеза, инородных тел, гранулём и т.д. После сегментации программы формируют виртуальные трехмерные модели. Полученные трехмерные модели загружают в программы трехмерного проектирования: 3ds max, Maya, Blender, 3-maticMedical и прочие (рис. 20, а). В системах проектирования выполняют расстановку имплантатов (рис. 20, б). Затем формируют поверхность-отжимку (рис. 20, в), придав толщину которой, получают замкнутую модель челюсти без поднутрений (рис. 20, г). После этого размещают объекты-трубки с толщиной 0,6-1 мм в область устанавливаемых имплантатов и выравнивают их положение по расставленным имплантатам. Длина трубок определяется длиной используемых фрез, принимая в расчет погружение их нижнего края в альвеолярный отросток. Это необходимо для получения выраженного рельефа нижней стороны шаблона, который будет задавать однозначное положение шаблона на челюсти. Далее создают объекты – трубки с внутренним диаметром 1,5 мм и длиной 10 мм, которые будут служить втулками для винтовой фиксации шаблона к челюсти. Эти трубки погружают в кость на 5-7 мм и располагают между имплантатами в 2-х или 3-х максимально взаимоудаленных областях (рис. 20, д). Полученные трубки соединяют балками сечением не менее 4 мм² (рис. 20, е). В завершение выполняют булеву операцию «вычитание»: из модели шаблона вычитают модель отжимки альвеолярного отростка (рис. 20, ж).

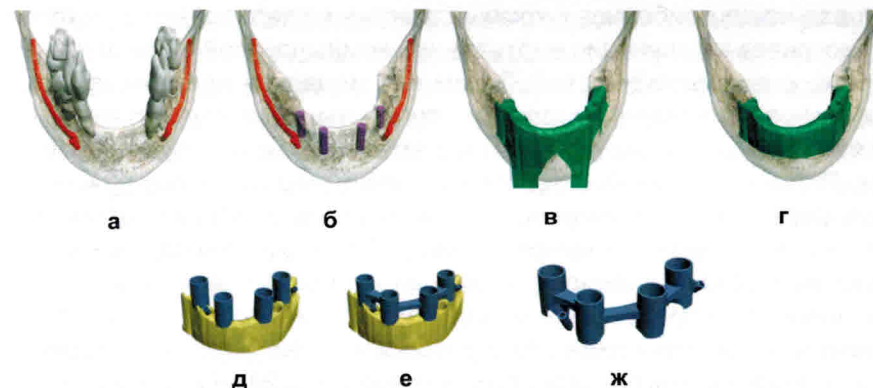


Рис. 20. а-ж – последовательность моделирования наkostного кобальтохромового шаблона. Пояснения в тексте

Печать шаблона. Этот этап выполняют в зуботехнической лаборатории. Для печати пластмассовых частей используют способ лазерной стереолитографии. В основе этого способа лежит процесс полимеризации жидкой фотополимеризующейся композиции – ФПК. Для этого трехмерная модель с помощью программы-слайсера разбивается на слои, толщина которых может достигать до 40 микрон, затем программа создает оптимальную траекторию для лазерного луча. Выращивание объекта происходит в ванне с жидкой ФПК на сетчатой платформе. После отверждения очередного слоя полимера толщиной 40-150 микрон платформа опускается на ту же величину, и процесс повторяется.

Изготовление металлических шаблонов выполняют методом селективного послойного спекания порошка кобальтохромового сплава при помощи мощного лазера.

Имплантация по хирургическим шаблонам позволяет максимально точно расположить имплантаты, а также заранее изготовить временные ортопедические конструкции, которые после корректировки могут быть установлены пациенту в день операции.

3.2. Проектирование шаблонов для костно-реконструктивных операций в челюстно-лицевой области

Реконструкцию костей лицевого отдела черепа выполняют методами костно-пластической остеотомии, трансплантации, имплантации эндопротезов, их сочетанием. Для разработки плана такого лече-

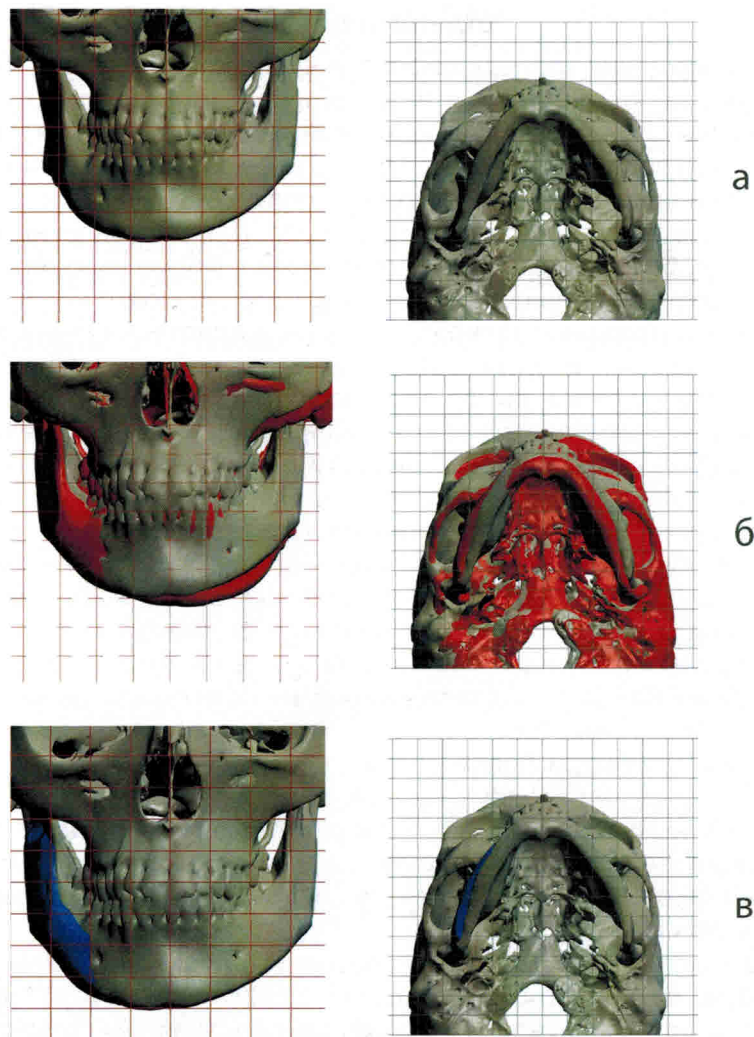


Рис. 24. Этапы проектирования контурного эндопротеза нижней челюсти. а – исходная деформация; б – выяснение недостающего объема ветви и тела нижней челюсти справа путём отражения «здоровой» стороны; в – окончательное формирование модели прототипа с расчетом на редукцию нижнего края тела нижней челюсти справа по нижнему краю эндопротеза

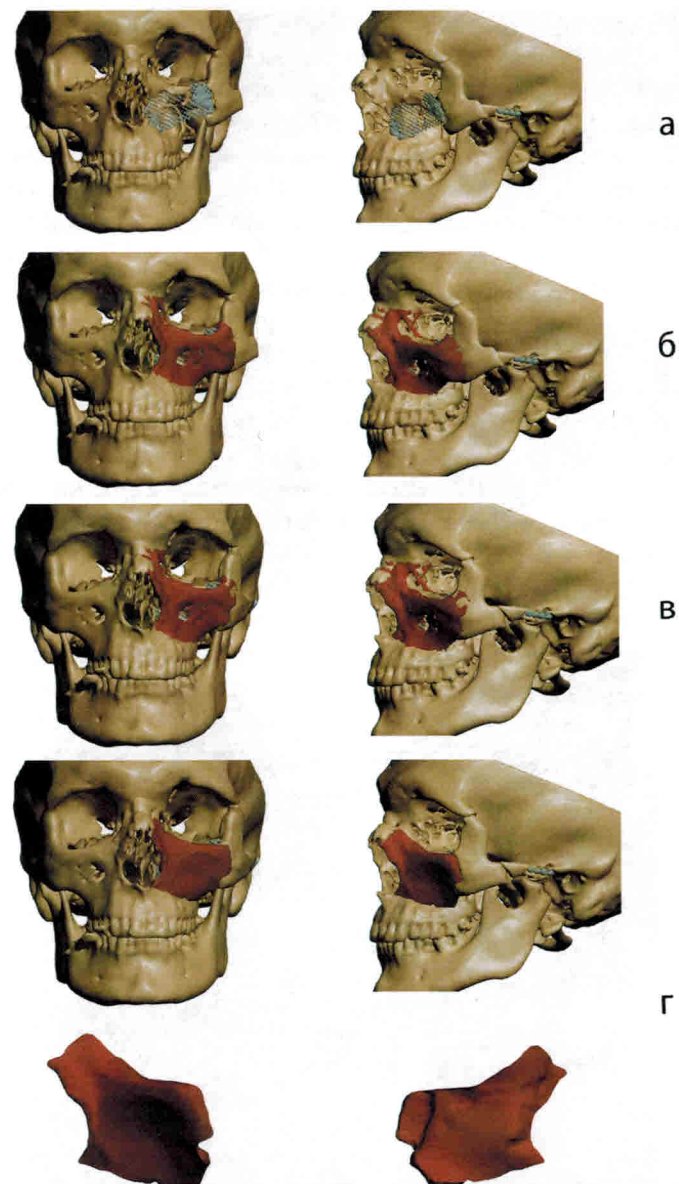


Рис. 25. Моделирование индивидуального эндопротеза. а – модель черепа до протезирования; б – планирование необходимого объема кости путём отражения здоровой стороны; в – моделирование репозиции скуловой кости; г – отмоделированный эндопротез

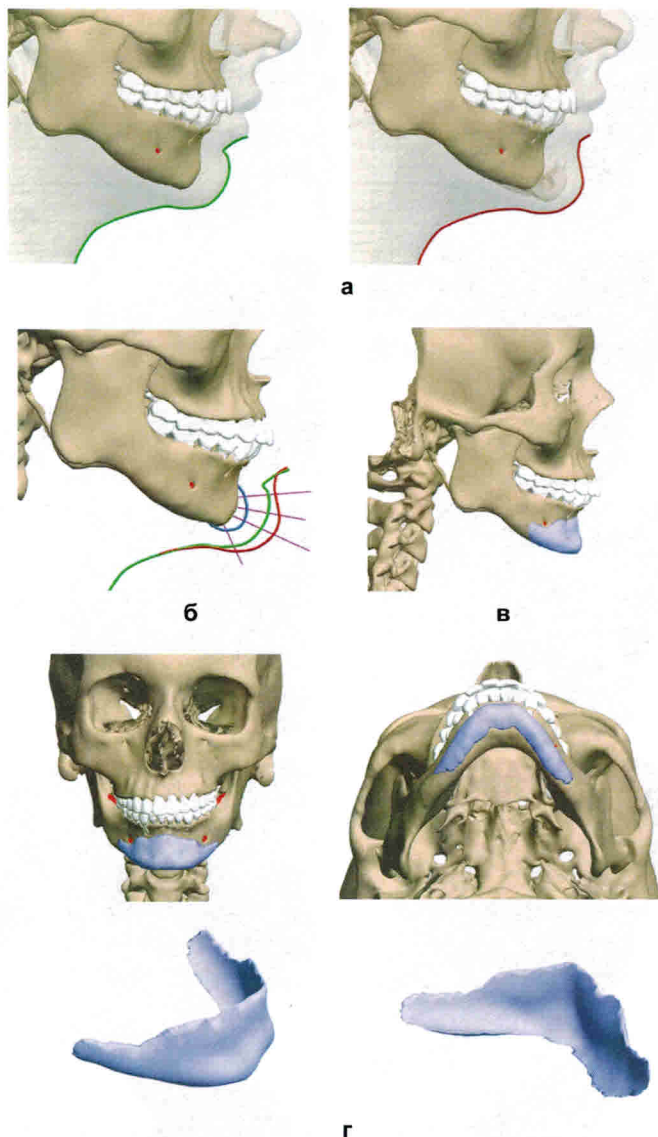


Рис. 26. Проектирование подбородочного имплантата с учетом желаемого контура нижней зоны лица

вследствие тяжёлой черепно-мозговой травмы. Такие эндопротезы изготавливают из титановой сетки, либо пористой керамики на основе гидроксилатапата. В эстетической хирургии часто используются эндопротезы подбородка (рис. 26). При этом основой для модели служит планирование желаемого контура мягких тканей лица. Для этого в упрощенном варианте используется моделировка кривых выступаания подбородка, в более сложных методиках – обратный метод конечных элементов.

При моделировке с помощью кривых сначала создают кривую имеющегося контура подбородка, затем средствами виртуальной скульптуры определяют желаемое положение мягких тканей и создают кривую контура (рис. 26, а). После этого создают кривую контура выступаания эндопротеза с таким расчетом, чтобы его толщина соответствовала разнице расстояний желаемого контура и имеющегося. При этом направление формирования контура должно соответствовать нормальям модели наружной поверхности подбородочного отдела нижней челюсти (рис. 26, б – нормали выделены розовым цветом). Затем используют образец подбородочного отдела нижней челюсти (рис. 26, в), который адаптируется по размерам и профилю. Путем логического вычитания образцовой и имеющейся моделей подбородочного отдела получают модель прототипа эндопротеза (рис. 26, г).

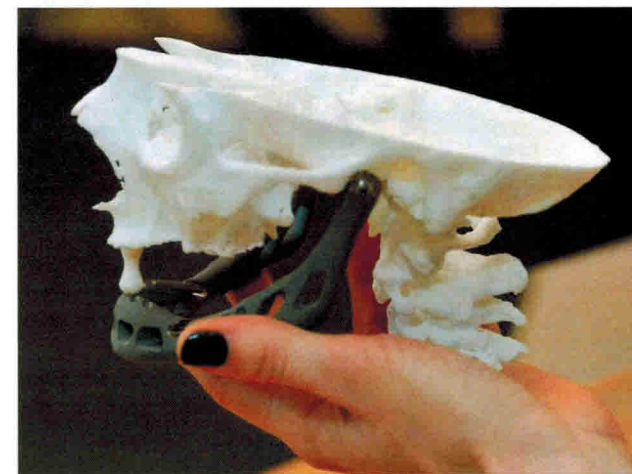


Рис. 27. Первый индивидуальный титановый эндопротез нижней челюсти, изготовленный и успешно имплантированный в 2012 г.