

# Применение систем автоматизированного проектирования и аддитивных технологий в восстановительной хирургии

В.В. Внук<sup>1</sup>, Е.В. Ипполитов<sup>1</sup>, М.М. Новиков<sup>1</sup>, С.А. Черобыло<sup>1</sup>  
vnuk@shatura.laser.ru | ippevg@yandex.ru | novikov@rambler.ru | Svetlana.cherebylo@rambler.ru

<sup>1</sup>Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН –  
филиал Федерального государственного учреждения  
«Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника»  
Российской академии наук», г.Шатура, Московская обл., РФ

*В данной работе обобщен опыт использования современных методов лучевой диагностики в сочетании с компьютерными и телекоммуникационными технологиями при планировании реконструктивно-восстановительных операций в нейрохирургической и челюстно-лицевой практике. Современная медицина не стоит на месте, она постоянно развивается и совершенствуется. Благодаря появлению высокотехнологической медицины сегодня, возможно, проводить сложнейшие хирургические операции и дать человеку, столкнувшемуся с серьезными нарушениями, продолжить достаточно качественную и полноценную жизнь. Создание цифровой модели, используя данные конкретного пациента, применение компьютерного моделирования и аддитивных технологий стало настоящим прорывом во многих направлениях хирургии. На сегодняшний день такой подход при планировании реконструктивно-восстановительных операций уже прошел апробацию во многих медицинских учреждениях и вносит значительный вклад в развитие современной медицины.*

*Ключевые слова: спиральная компьютерная томография, цифровая модель, компьютерное моделирование, CAS-технологии, аддитивные технологии, лазерная стереолитография, восстановительная хирургия.*

## Application of computer-aided design systems and additive technologies in reconstructive surgery

S A Cherebylo<sup>1</sup>, E V Ippolitov<sup>1</sup>, M M Novikov<sup>1</sup>, S V Vnuk<sup>1</sup>  
vnuk@shatura.laser.ru | ippevg@yandex.ru | novikov@rambler.ru | Svetlana.cherebylo@rambler.ru

<sup>1</sup>Institute on Laser and Information Technologies – Branch of Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics” of Russian Academy of Sciences, Svyatoozerskaya 1, 140700 Shatura, Moscow Region, Russia

*This work summarizes the experience of using modern methods of radiation diagnostics in combination with computer and telecommunication technologies in planning reconstructive operations in neurosurgical and maxillofacial practice. Modern medicine does not stand still, it is constantly developing and improving. Thanks to the emergence of high-tech medicine today, it is possible to carry out complex surgical operations and to give a person who has faced serious injury, to continue a fairly high-quality and full life. The creation of a digital model and the use of computer simulation using the data of a particular patient, was a real breakthrough in medicine, because this technology is very quickly found its practical use in many areas of surgery. To date, this approach in the planning of reconstructive surgery has already been tested in many medical institutions and makes a significant contribution to the development of modern medicine.*

*Keywords: Spiral computed tomography, digital model, computer modeling, computer-aided surgery (CAS), additive technology, laser stereolithography, reconstructive surgery.*

### 1. Введение

Широкое внедрение нового поколения спиральных компьютерных томографов значительно расширило возможности использования этой технологии в реконструктивной хирургии [8]. Специализированное программное обеспечение позволяет оперативно производить обработку томографических данных и создавать цифровые трехмерные модели любого дефекта и деформации черепа, проводить моделирование имплантатов, максимально соответствующих области повреждения, для проведения реконструктивных операций.

Цифровые модели все активнее используются при подготовке и планировании оперативного вмешательства в челюстно-лицевой хирургии, хирургии шеи и позвоночника, торакальной хирургии, ортопедии и нейрохирургии [9]. Качество изображения, получаемого в компьютерной томографии, определяется пятью основными факторами: пространственным разрешением, контрастностью, шумом и пространственной однородностью, линейностью и наличием артефактов [10]. Основное влияние на точность

цифровой модели оказывают артефакты и шумы томографических изображений.

Шум и пространственная однородность - различные КТ-числа для ткани с однородной плотностью, вызванные недостатками прохождения фотонов через ткань. В зависимости от источника возникновения, шум разделяют на квантовый (результат ограничения фотонов, достигающих датчиков), электронный (вызванный электрическим взаимодействием в самой системе), вычислительный (приближения, используемые в процессе измерения) и лучевой (вызванный рассеиванием излучения).

Артефактами изображений в компьютерной томографии называют любое несоответствие между КТ-числами реконструированного изображения и истинными коэффициентами ослабления объекта. Артефакты могут проявляться в виде полос (ошибка в отдельном измерении), затемнений (постепенное отклонение группы каналов), колец (ошибки калибровки отдельного детектора), искажений (спиральная реконструкция). Довольно часто в исследуемой области присутствуют объекты с высокой плотностью, например, сделанные из металла, что вызывает на изображении появление артефактов в виде полос.

Движение пациента также дает артефакты в виде полос или размывания изображения.

Все отмеченные проблемы, связанные с получением высокоинформативных данных в компьютерной томографии требуют применения специальных программ для обработки полутоновых изображений перед преобразованием их в компьютерные модели, соответствующих реальным биологическим объектам.

## 2. Обработка томограмм при челюстных дефектах

При травмах челюстно-лицевой области достаточно часто встречаются случаи, когда человек получивший повреждения проходит не один этап хирургического лечения и уже имеет установленные металлические конструкции, которые при рентгеновском исследовании дают на изображениях «блики» и «засветы» в виде полос, искажающие реальную структуру костной ткани.

Подобная картина получается при наличии на зубах металлических коронок либо брекетов, что ухудшает качество и точность цифровой модели для планировании хирургической операции (рис.1).

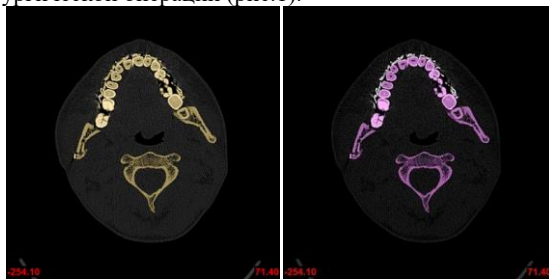


Рис.1. Аксиальные срезы зубного ряда с брекетами до и после редактирования.

Результаты такой обработки представлены на компьютерных моделях (рис.2).

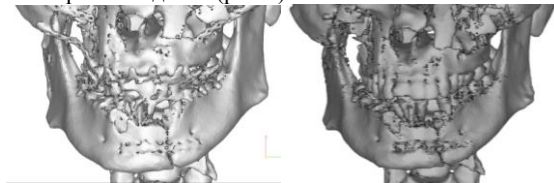


Рис.2. 3D модели до и после редактирования.

В настоящее время специализированные программы обработки томографических данных не обладают автоматической системой распознавания таких дефектов изображения. Удаление артефактов от объектов повышенной плотности происходит их стиранием на изображении, используя графический редактор программы. При этом приходится в ручном режиме последовательно обрабатывать десятки томограмм.

## 3. Обработка томограмм при краниопластике

Дополнительно обрабатывать данные КТ приходится и для планирования операции при пластике дефекта черепа. Краниопластика – очень распространенная операция в настоящее время. Она проводится для реконструкции костей черепа после декомпрессионной трепанации черепа или после получения механической травмы. Основная задача данной операции – это закрытие дефекта черепа биоимплантатом. Но возникают случаи, когда пациенту необходимо удалить ранее установленный имплантат, а уже потом смоделировать новый, более точный имплантат. Для этого производится виртуальное удаление старого имплантата на томографических изображениях (рис.3).

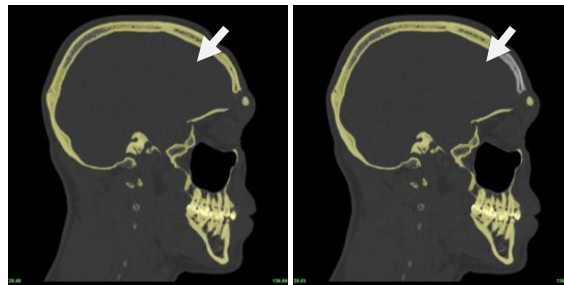


Рис.3. Сагиттальный срез КТ до и после виртуального удаления имплантата.

После получения компьютерной модели без имплантата (рис.6) также виртуально, без участия пациента проводится компьютерное моделирование нового имплантата (рис.7).

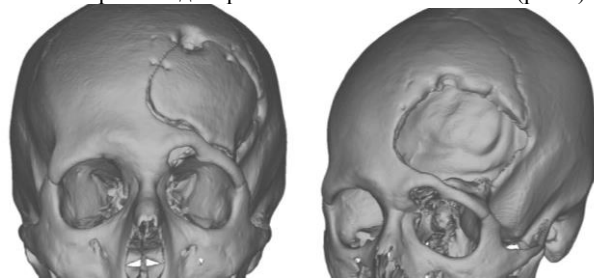


Рис.4. 3D модель черепа до и после редактирования.

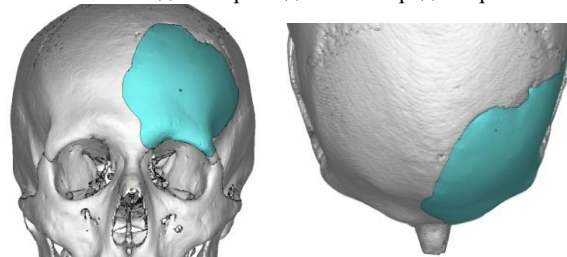


Рис.5. Моделирование шаблона имплантата.

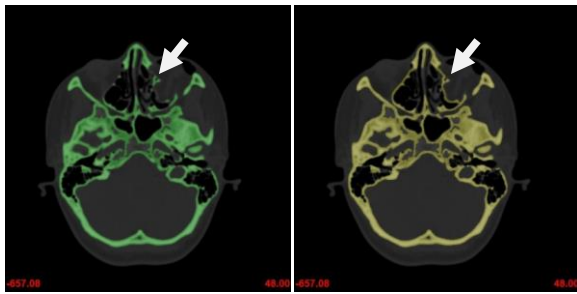
Это позволяет заменить две сложных хирургических операций сначала по удалению старого имплантата, а потом установки нового, а сделать все в одном операционном процессе. Такой подход не только уменьшает стоимость и время операций, но значительно способствует быстрому восстановлению пациента за счет уменьшения времени, проведенным под наркозом и снижению объема хирургического вмешательства.

## 4. Обработка томограмм при дефектах скулоглазничного комплекса

Переломы скулоглазничного комплекса очень распространенная травма в челюстно-лицевой хирургии. Для более детального изучения клинической картины, а также планирования хирургического лечения необходимо использование 3D моделирования.

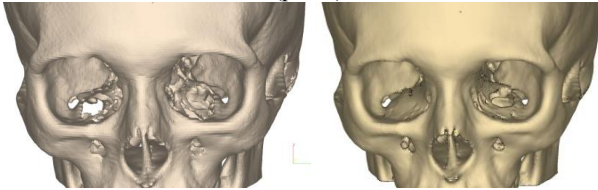
Анализируя визуализацию данных КТ, мы часто видим картину, что латеральная, медиальная стенки глазницы имеют прерывистую структуру кости или можно сказать, что получаем «ложные дыры», что не позволяет увидеть на модели точные границы дефекта. Это связано с тем, что сами кости глазничной области имеют от природы незначительные толщины (менее 1 мм), а при стандартном прохождении КТ исследования разрешения томографа не хватает, чтобы отсканировать кость в полном объеме.

Современное программное обеспечение позволяет не только визуализировать данные КТ «в автоматическом режиме», но и дает возможность редактировать каждое изображение во всех проекциях. Для решения данной задачи необходимо доработать каждый срез вручную тем самым восстановить точную анатомическую картину (рис.6).



**Рис.6.** Редактирование КТ изображения стенки глазницы.

На компьютерной модели, полученной после дополнительной обработки томограмм четко видна область дефекта, что позволяет провести точное моделирование замещающего имплантата (рис.7).



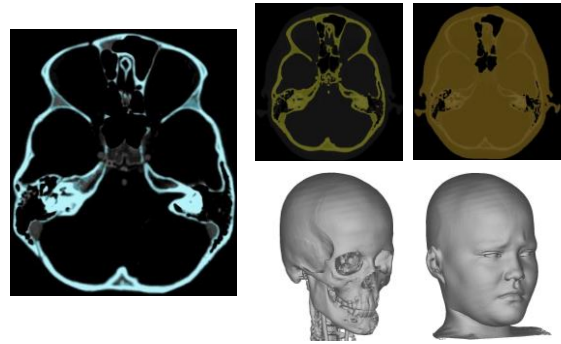
**Рис.7.** 3D модели стенок глазниц до и после редактирования томограмм.

Предварительная обработка изображения и восстановление информации позволяет смоделировать имплантат требуемой геометрической формы. Высокое соответствие имплантата зоне дефекта уменьшает вероятность развития воспалительных процессов, способствует ускоренному заживлению, повышает эффективность восстановления пациента.

## 5. Преобразование графических данных томографических обследований в трехмерные цифровые модели

Следующим шагом является преобразование обработанных результатов обследования пациентов на компьютерных томографах в трехмерную компьютерную модель. Для восстановления сложной геометрии костных дефектов с высокой точностью требуют использования сканирования с толщиной среза менее 0.5 мм.

Результаты КТ данных в формате DICOM [4] по электронной сети пересылаются в ИПЛИТ РАН. Опыт изготовления моделей по томографическим данным [5] показал, что объект исследования (например, череп человека) – достаточно сложное образование с большим количеством внутренних полостей и состоящее из биологических тканей разной плотностью. В то же время трехмерная твердотельная модель воспроизводит объект только одной плотности, поэтому очень важно выбрать пороговое значение плотности отсечки (определенное значение яркости на томограмме), которое определяет, что все участки данной плотности и выше становятся твердым телом, а участки пониженной плотности отсекаются. Томограммы содержат большой объем информации (типичный результат томографического исследования – 100-500 томограмм), стратификация, которой позволяет по результату одного исследования пациента построить несколько разных компьютерных моделей, например, черепа или головы с кожным покровом в целом (рис.8).



**Рис.8.** Один из срезов исследования КТ и примеры цифровых моделей при задании разных значений плотности отсечки.

## 6. CAS технологии

Разработка CAS технологий была начата в середине 1990-х годов и связана с развитием высокоинформационных методов диагностики (компьютерная и магниторезонансная томография), систем компьютерного моделирования и аддитивных технологий. В настоящее время эти технологии широко используются в современной медицине [2,3]. Первоначально они назывались Image Guided Surgery технологиями, а затем Computer Aided или Assisted Surgery – CAS технологиями. Внедрение CAS-систем позволяет добиться значительного повышения эффективности работы хирурга за счет учета индивидуальных особенностей пациента, оптимизации операционного процесса и минимизации хирургического вмешательства.

Задачу автоматизированного сопровождения работы хирурга во многих случаях можно рассматривать как техническую задачу и использовать для ее решения эффективные и проверенные технологии компьютерного моделирования, CAD/CAE/CAM системы. В настоящее время такой подход реализуется с помощью специальных технологий подготовки хирургического вмешательства, включая диагностику, а также предоперационное планирование и интраоперационное сопровождение. Это позволяет повысить уровень безопасности пациента и снизить риск послеоперационных осложнений [8]. Подготовка оперативного вмешательства с использованием CAS технологий проводится хирургами совместно с высококвалифицированными техническими специалистами, использующими различные прикладные программные системы CAD/CAM и аддитивные технологии для изготовления шаблонов, оснастки и имплантатов.

CAS системы предназначены для повышения эффективности работы хирурга и минимизации хирургического вмешательства [7]. Это достигается путем решения следующих задач:

- трехмерная визуализация данных компьютерной томографии;
- построение трехмерной геометрической модели на основе этих данных;
- предоперационное планирование;
- компьютерное моделирование по индивидуальной трехмерной модели пациента;
- изготовление индивидуальной биомодели пациента;
- изготовление прецизионных имплантатов и шаблонов для операции
- интраоперационное сопровождение.

В ИПЛИТ РАН были успешно решены эти задачи для ряда сложных хирургических операций.

## 7. Аддитивные технологии в хирургии

В ИПЛИТ РАН разработана и успешно применяется лазерная стереолитография - одна из первых аддитивных технологий, основанная на лазерной полимеризации жидких фотополимерных композиций [5].

В ИПЛИТ РАН лазерная стереолитография для медицины была впервые применена в 1994 г. в рамках проведения судебно-медицинской экспертизы по идентификации, найденных под Екатеринбургом останков царской семьи, которая проводилась Центром судебно-медицинской экспертизы Минздрава РФ. Впервые в России по данным компьютерного томографа методом лазерной стереолитографии была изготовлена пластиковая копия человеческого черепа с точностью, пригодной для проведения судебно-медицинской экспертизы [1].

Спиральный компьютерный томограф позволяет провести сканирование всего черепа всего за несколько минут. Для восстановления сложной геометрии костных дефектов черепа с высокой точностью требуют использования сканирования с толщиной среза менее 0.5 мм. Программное обеспечение, реализованное на быстродействующих компьютерных системах, позволяет оперативно производить обработку полученных данных и создавать трехмерные модели любого дефекта и деформации черепа, проводит моделирование имплантатов, максимально соответствующих области повреждения, до проведения реконструктивных операций. А современные методы аддитивного производства трехмерных объектов, в частности - лазерная стереолитография, позволяет изготавливать пластиковые копии любых фрагментов костного скелета человека. Изготовление медицинских имплантатов является ярким примером единичного производства, так как каждый имплантат делается для конкретного пациента.

Компьютерное моделирование и лазерная стереолитография позволила сделать значительный шаг в реконструктивной челюстно-лицевой хирургии, как в улучшении косметического, так функционального результатов оперативных вмешательств [2].

Разработанные методы обработки томографических данных позволяют построить на их основе компьютерные трехмерные модели высокой степени точности для использования в восстановительной хирургии и планировании особо сложных операций. Совместно с Главным клиническим военным госпиталем им. Н.Н. Бурденко г. Москва, хирург Терещук С.В. было впервые в декабре 2007 года проведено предварительное планирование сложной хирургической операции по аутотрансплантации и восстановлению функциональности ротового аппарата после резекции злокачественной опухоли нижней челюсти. Цель исследования — снижение сроков реабилитации больных злокачественными новообразованиями челюстно-лицевой области путем устранения дефекта нижней челюсти после ее резекции методом аутотрансплантации.

Первичные реконструктивные вмешательства являются приоритетным направлением хирургического лечения, т. к. они позволяют достаточно быстро восстановить жизненно важные функции в послеоперационном периоде и сократить сроки реабилитации пациентов [6].

## 8. Заключение

В докладе приведены результаты работы ИПЛИТ РАН по обработке данных обследования на компьютерном томографе и получения точных цифровых биомоделей требуемых зон для подготовки и планирования сложных операций в восстановительной хирургии. Применение

компьютерной томографии, компьютерного моделирования позволяет хирургам планировать в деталях операционный процесс, уменьшить фактическое время операции (что особенно важно для детей), увеличить качество операции и, как следствие, уменьшить период восстановления.

## 9. Благодарности

Данная работа сделана при финансовой поддержке РФФИ (Грант мк № 18-29-03238). Работа по лазерной стереолитографии выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (Государственное задание ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН).

## 10. Литература

- [1] Абрамов С.С., Болдырев Н.И., Евсеев А.В., Коцюба Е.В., Новиков М.М., Панченко В.Я., Семешин Н.М., Якунин В.П. // Судебно-медицинская экспертиза. 1998. № 41 (3). С. 13.
- [2] Евсеев А.В., Ипполитов Е.В., Новиков М.М., Черыбыло С.А. Применение лазерной стереолитографии в медицине в монографии «Современные лазерно-информационные технологии», под ред. В.Я. Панченко и Ф.В.Лебедева, М.: Интерконтакт Наука, 2015, стр.358-373.
- [3] Жук Д.М., Перфильев С.А. CAS системы - системы автоматизированного проектирования в хирургии. // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». – М, электронный журнал, №3 март 2011 г., С.12. <http://technomag.edu.ru>
- [4] Кравчук А., Потапов А., Корниенко В., Панченко В., Евсеев А., Шурхай В., Биттиров А. «Поиск оптимальных материалов и технологий изготовления имплантов при реконструктивной хирургии посттравматических дефектов и деформаций черепа», Российская нейрохирургия, № 2 (17), 2006 г.
- [5] Хофер М. Компьютерная томография. Базовое руководство. М.: Мед.лит., 2008, С.224.
- [6] Antony A, Chen W, Kolokythas A, Weimer K, Cohen M. Use of virtual surgery and stereolithography-guided osteotomy for mandibular reconstruction with the free fibula. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery* 2011;128(5);1080-1084.
- [7] Guang-Ye Wang, Wen-Jun Huang, Qi Song, Yun-Tian Qin & Jin-Feng Liang (2016) Computer-assisted virtual preoperative planning in orthopedic surgery for acetabular fractures based on actual computed tomography data, *Computer Assisted Surgery*, 21:1, 160-165.
- [8] Rodby K, Turin S et al. Advances in Oncologic Head and Neck Reconstruction: Systemic Review and Future Considerations of Virtual Surgical Planning and Computer Aided Design / *Computer Aided Modeling. Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery* 2014 Sep; 67(9):1171-1185.
- [9] "Computer Assisted Surgery. Precision Technology for Improved Patient Care", March 22, 2004, <http://www.advamed.org/newsroom/caswhitepaper.pdf>.
- [10] Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM), National Electrical Manufacturers Association, Rosslyn, USA. <http://medical.nema.org/standard.html>

## Об авторах

Новиков Михаил Михайлович, заведующий лабораторией ЛСОИ, ИПЛИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, ул. Святоозерская, д. 1, г. Шатура, Московская область, РФ, тел.: (49645) 22200 доб.459. [novikov@rambler.ru](mailto:novikov@rambler.ru)

Черобыло Светлана Александровна, научный сотрудник ИФЛИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, ул. Святоозерская, д. 1, г. Шатура, Московская область, РФ, тел.: (49645) 22200 доб.151. Svetlana.cherebylo@rambler.ru.

Внук Вячеслав Владимирович, младший научный сотрудник ИФЛИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, ул. Святоозерская, д. 1, г. Шатура, Московская область, РФ, тел.: (49645) 22200 доб.151, vnuk@shatura.laser.ru

Ипполитов Евгений Викторович, младший научный сотрудник ИФЛИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, ул. Святоозерская, д. 1, г. Шатура, Московская область, РФ, ippevg@yandex.ru тел.: (49645) 22200 доб.151.