Цифровой рентген: археология и палеонтология

В прошлой статье из цикла «Цифровой рентген» мы бросили клич всем заинтересованным в микротомографических исследованиях. Это принесло свои плоды, приезжали как коллеги-технари, так и представители от научного сообщества.

Сегодня мы бы хотели рассказать про опыт сотрудничества с Марией Борисовной Медниковой, известным антропологом, доктором исторических наук Института Археологии РАН.

В тексте будет много человеческих черепов и костей крупным планом, так что если это вызывает у вас дискомфорт — еще не поздно переключиться на другую статью. Enjoy!

Статья — плод нескольких умов, для сохранения авторства применяется следующая легенда:

Курсив: Мария Борисовна Медникова, научный руководитель со стороны Института Археологии

Подчеркивание: Артём Авакян, наш исследователь и «дока» в области томографии

Остальное — ваш покорный слуга, Артём Устинов.

Да, если есть желание чуть глубже копнуть в физику рентгеновской визуализации и пообщаться — заходите в нашу лабораторию на ResearchGate. Сейчас там не шибко много всего, но Артёмы над этим работают;)

Интро

Археология изучает материальную культуру прошлого, физическая антропология – останки людей древности и средневековья, поступающие из археологических раскопок. Компьютерная томография и микротомография позволяют получить цифровые трехмерные копии уникальных артефактов и антропологических находок, не разрушая, исследовать их внутреннюю структуру. Таким образом, редкие объекты культурного наследия сохраняются для дальнейшего изучения другими методами и для последующего музейного хранения.
Применение микротомографии стало неотъемлемой частью исследований в области палеопатологии, описывающей болезни и травмы у представителей древнего населения.

Чем микротомография отличается от просто томографии? В первую очередь размером объекта. Микротомография работает с объектами от 1 до 200 мм диаметром. Томография — с большими медицинскими (человек в целом, череп-челюсть) или промышленными объектами (от двигателя до целого автомобиля).

Во вторую очередь разрешением картинки, это касается отличия медицинской КТ от микро КТ и промышленной КТ. Медицинская КТ имеет, как правило, разрешение 512^3 или 1024^3 вокселей, что немного. Обусловлено это минимизацией дозы на пациента и повышением скорости захвата проекций.

Для микро КТ пределов по разрешению особо нет, обычно от 2k^3 до 5k^3. Дозу можно дать любую, время захвата от 30 минут до 12 часов, иногда даже дней, в особо тяжелых случаях. Чем больше диаметр объекта — тем более высокого разрешения детектор следует применять, иначе размер вокселя может скрыть дефект.

Предмет исследования

Мы применили микротомографию, изучая серию образцов, происходящих из раскопок археологических культур разной древности – от эпохи бронзы 4-3 тысячелетий до н.э. до позднего средневековья. Результаты сканирования очень многообещающие. Именно благодаря радиологическому исследованию нам удалось выявить наличие онкологических заболеваний у населения степного пояса Евразии (Оренбургская, Воронежская области) еще 6-5 тысячелетий назад. А ведь онкология считается «болезнью цивилизации». Это

позволяет, в перспективе, исследовать негативные факторы, с которыми столкнулись люди в глубокой древности, факторы, по-видимому, связанные с их образом жизни ранних металлургов. Среди исследованных нами объектов – представители эпохи великого переселения народов, изменившего в первом тысячелетии нашей эры политическую и этническую карту Европы и Азии. И здесь очень важны данные об уровне травматизма в процессе боевых столкновений. Микротомография, позволившая виртуально «удалить» последствия реставрационного воздействия, помогла исследовать трехмерные реконструкции черепов в области повреждений, полученных при стреляных ранениях, применении боевых топоров и чеканов. Теперь мы можем реконструировать схему боя и эффективность разного оружия в ту или иную эпохи. И наконец – удалось получить убедительные радиологические доказательства эффективности лечебных действий в эпоху раннего средневековья. Травмы и трепанации, совершавшиеся в это время, часто несут следы исцеления людей, живших после их получения долгое время. Для диагностики степени заживления подобных повреждений метод микротомографии абсолютно незаменим.

Образец исследования – череп человека, обнаруженный в процессе археологических раскопок. Необходимо получить полноформатную цифровую копию образца с разрешением ≤ 150 мкм с целью анализа структурных особенностей и деформаций черепа. Поиск некоторых областей интереса выполняется уже по результатам томографии. Основной технической сложностью на этапах как получения, так и обработки томографических проекций, является объем области реконструкции. Физические габариты черепа: диаметр – 150..250 мм, высота – 250..350 мм. Оценка объема реконструкции при глубине градаций серого в 16 бит и размере вокселя 200 мкм составляет $V = (\pi d^2 h/4)(1/v^3)16 \geq 15$ Гб данных. Также, при выборе рентгеновских параметров съемки учитывается относительно высокая рентгеновская плотность костной ткани, возможное рассеяние излучения и эффект ужесточения спектра.

Немного о железе

Томографию мы проводили на своем самом первом томографе, даже вернее испытательном стенде томографии. Он кривой, косой и без шкафа рентгеновской защиты (стоит в рентгенозащитной комнате), но работает за двоих.
Технические характеристики:

Параметр	Значение
Детектор	Марк 2430CG
Размер пикселя, мкм	49,5
Размер кадра, мм	228 * 290
Размер кадра, пиксель	4610 * 5890
Рентгеновский источник	РАП-150, ЗАО ЭлтехМЕД
Напряжение, кВ	110
Захват проекций	Полный оборот, равными шагами
Угловой шаг, градус	0,4
Число проекций	900
Время записи проекций, мин	90
Объем данных проекций, Гб	45,5
ПО реконструкции	Siemens CERA
Размер вокселя, мкм	125
Объем данных реконструкции, Гб	8..15 в зависимости от объекта/обрезки
Время реконструкции, мин	3
Время работы оператора при подготовке реконструкции, мин	45

Главная «фишечка» этого стенда томографии — можем поставить любой детектор собственного производства и «тщательно доработать напильником». Для данного исследования мы выбрали топовый детектор Марк 2430 с матрицей 27 мегапиксел. Это очень круто, поверьте на слово. Пара комментариев про рентгеновский аппарат — ранее я озвучивал, что для микротомографии применяется специфический класс аппаратов, называемых микрофокусными.

Проще говоря, рентген выходит из точки микронного размера. Это сильно улучшает качество изображения и позволяет увеличивать «физически» картинку. На стенде использован отечественный аппарат от наших друзей из СПБ — компании «Элтех-Мед». Мы также используем несколько импортных аппаратов (Spellman, Hamamatsu), но для других задач, где требуется воксель 2-5 мкм.

Немного о софте

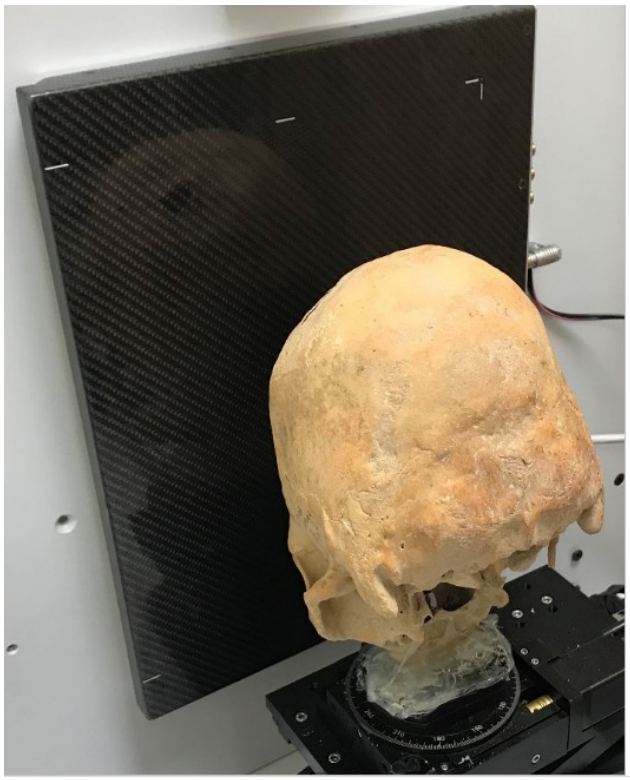
Для томографической реконструкции и анализа используем различные пакеты ПО в зависимости от задачи: VolumeGraphics VGS, Siemens CERA, ThermoFisher Avizo + несколько отечественных пакетов. В данном примере все изображения сделаны в Siemens CERA.

Эмпирическим путем стало понятно, что наибольшую сложность вызывает время подгрузки проекций в реконструктор (каждый объект – это 900 проекций по 50 Мб, в сумме 45 Гб) и сохранения результатов, а также невозможность адекватной работы по анализу в визуализаторе при объеме реконструкции, превышающем 15 Гб. Основной задачей стало максимальное сокращение объема данных при сохранении пространственного разрешения и диагностических характеристик томограммы.

Использованы следующие решения:
• позиционирование объекта так, чтобы на всех углах съемки проекция попадала в плоскость детектора;
• геометрическое увеличение при съемке порядка 1,3 раз;
• ориентация нулевой проекции соответствует анатомической ориентации черепа (лицом/затылком к рентгеновскому источнику);
• строгое ограничение объема реконструкции габаритами объекта (минимизация неинформативного объема «воздуха»);
• медианная 3x3 фильтрация проекций как приоритет над аппаратным биннингом;
• программное подавление артефактов ужесточения спектра (beam hardening), кольцевых артефактов.

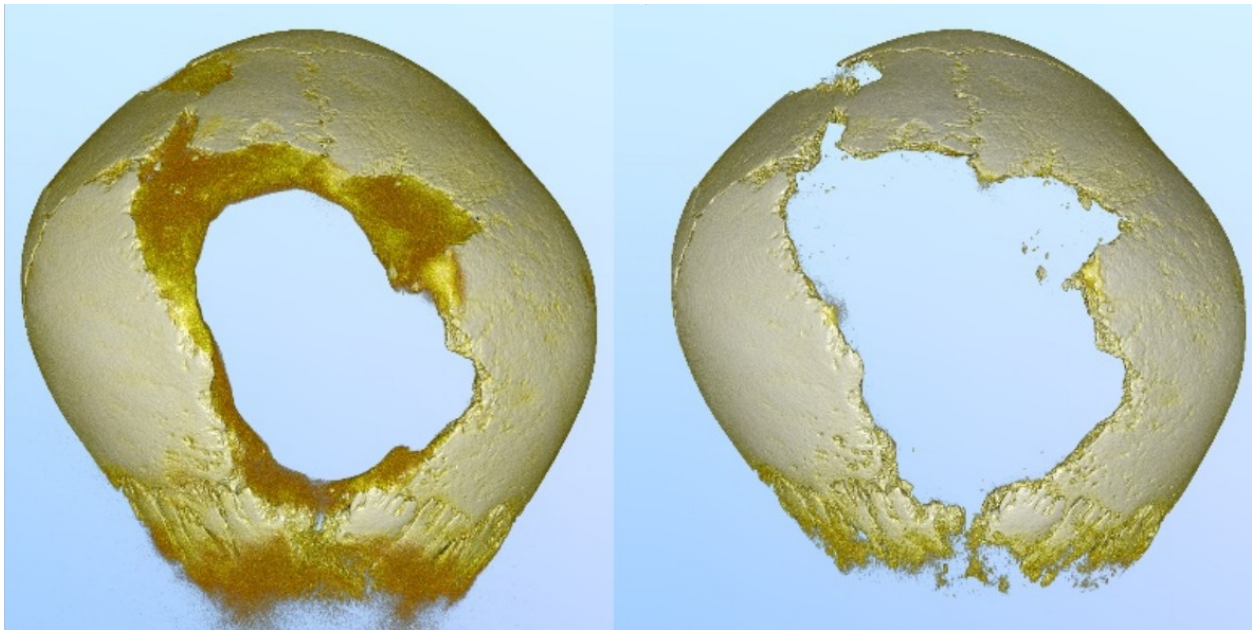
Да, под томографию желательно иметь очень производительную станцию. У нас была потребительская сборка: Core i7, 128 Gb RAM, GTX 2060 6 Gb, SSD диск. Часть ПО оптимизировано под CUDA и рендерит объекты в визуализаторе довольно шустро, а вот анализ объемов, в том же VG, реализован на CPU и это боль длиной в 15-60 минут на среднем датасете. Возлагаем большие надежды на AMD Threadripper (скоро привезут).

Выглядел процесс съемки примерно так:



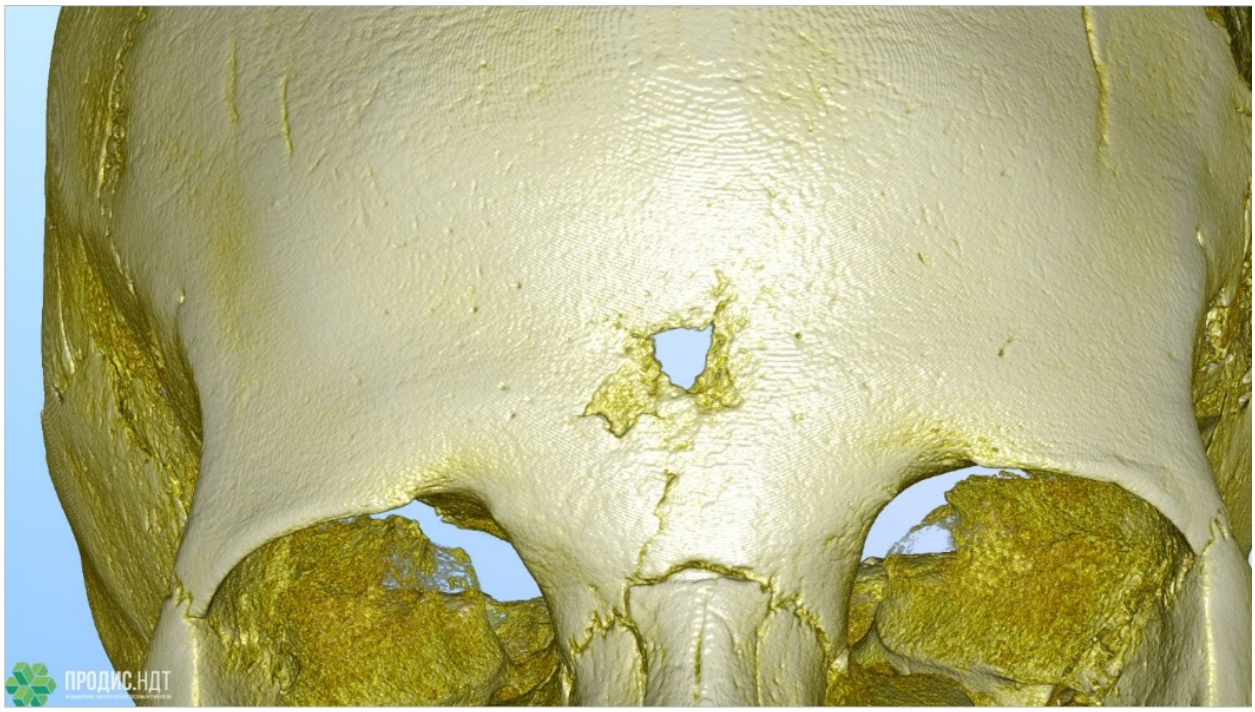
Что мы увидели

Антропологические материалы из музеев и научных лабораторий часто покрыты толстым слоем реставрационной мастики. Микротомография позволяет виртуально «убирать» эти поверхностные слои и описывать область, необходимую для конкретного исследования».
Мастика – это полимер со слабым поглощением рентгеновского излучения, так что программно разделить его в реконструированных данных не представляет большой сложности, сильно отличие от костной ткани. Ниже картинки до и после.



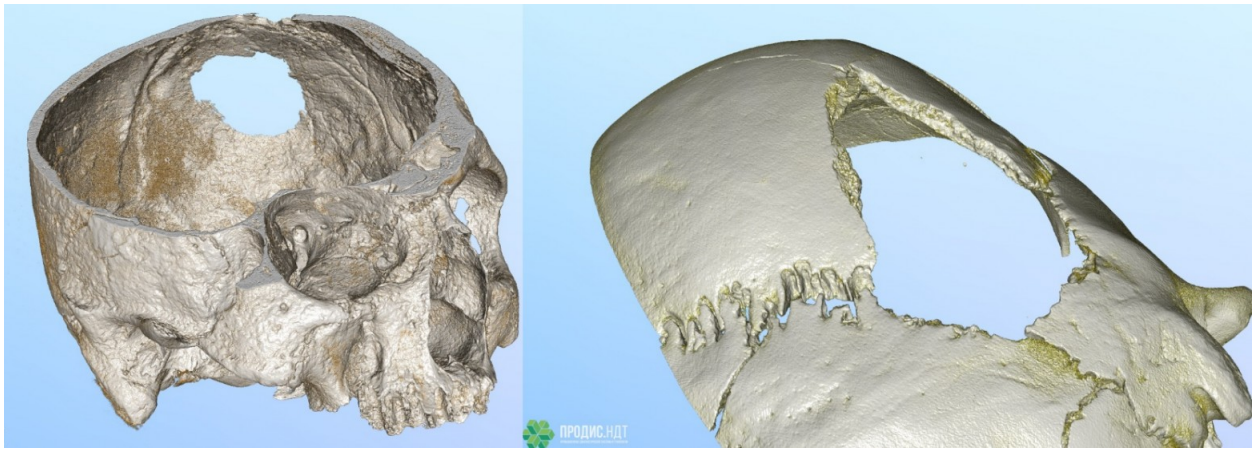
Социальная среда прошлого часто была агрессивной, и метод микротомографии позволяет оценить последствия боевых и бытовых ранений на скелетах и черепах людей из археологических раскопок. Трехмерная цифровая визуализация этих повреждений помогает специалистам определить тип применявшегося оружия и иногда, спустя столетия или тысячелетия, расследовать обстоятельства гибели людей.

Ниже видно удачное попадание стрелы, хедшот медного века.



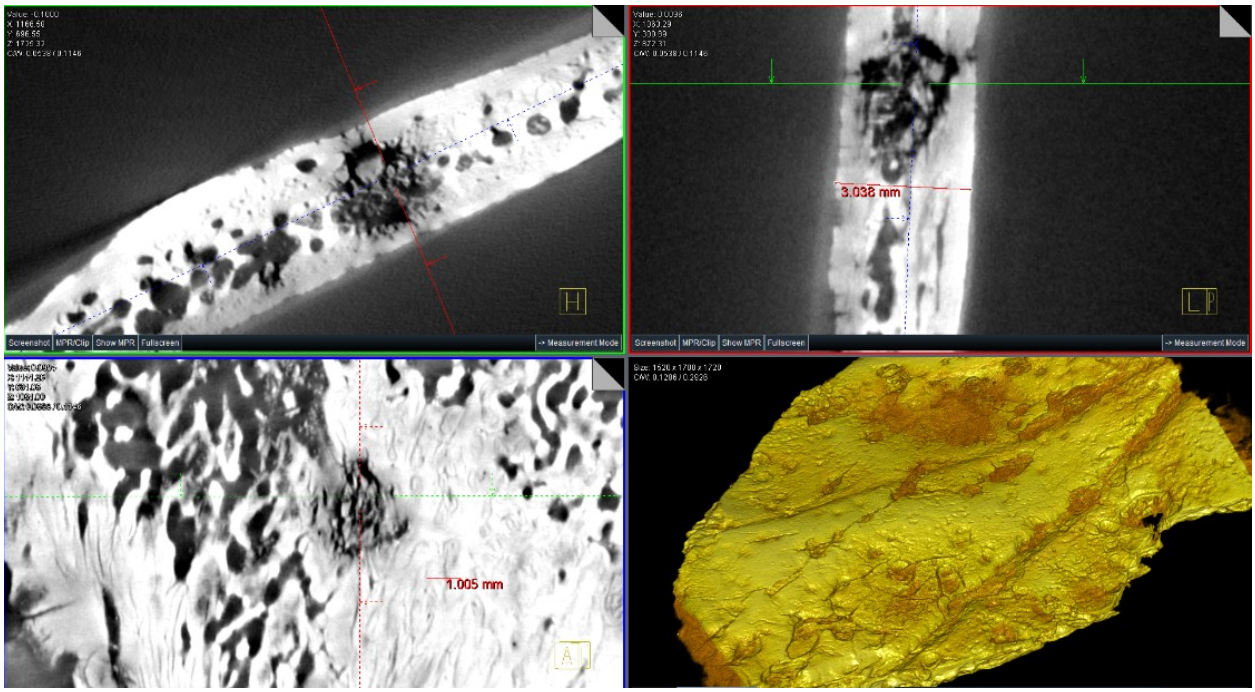
Другой аспект применения микротомографии – изучение последствий деятельности древних хирургов, некоторые из которых были очень искусны и производили сложные операции, например, трепанации черепа. Именно микротомография позволяет получить изображения с увеличением и в высоком разрешении, идентифицировать следы заживления и сделать выводы об успешности хирургического вмешательства.

Ниже трепанация черепа, если кто не понял. Можно было даже выжить после этого. Железные люди медного века, никаких антибиотиков, только природные силы организма.



Микротомография позволяет проводить дифференциальную диагностику многих болезней древнего населения. Например, благодаря методу возможно определить наличие метастатических поражений костной ткани и, следовательно, сделать выводы о древности распространения онкологических заболеваний.
Онкологические заболевания у древних людей можно диагностировать благодаря присутствию следов метастазов (вторичных опухолевых очагов) в костной ткани. В зависимости от заболевания они локализуются в своде черепа и определенных частях скелета, пронизанных сосудистой сетью. Микротомография позволяет выявить активное прорастание сосудов, питавших опухоли, и необычные очаги резорбции (разрушения).

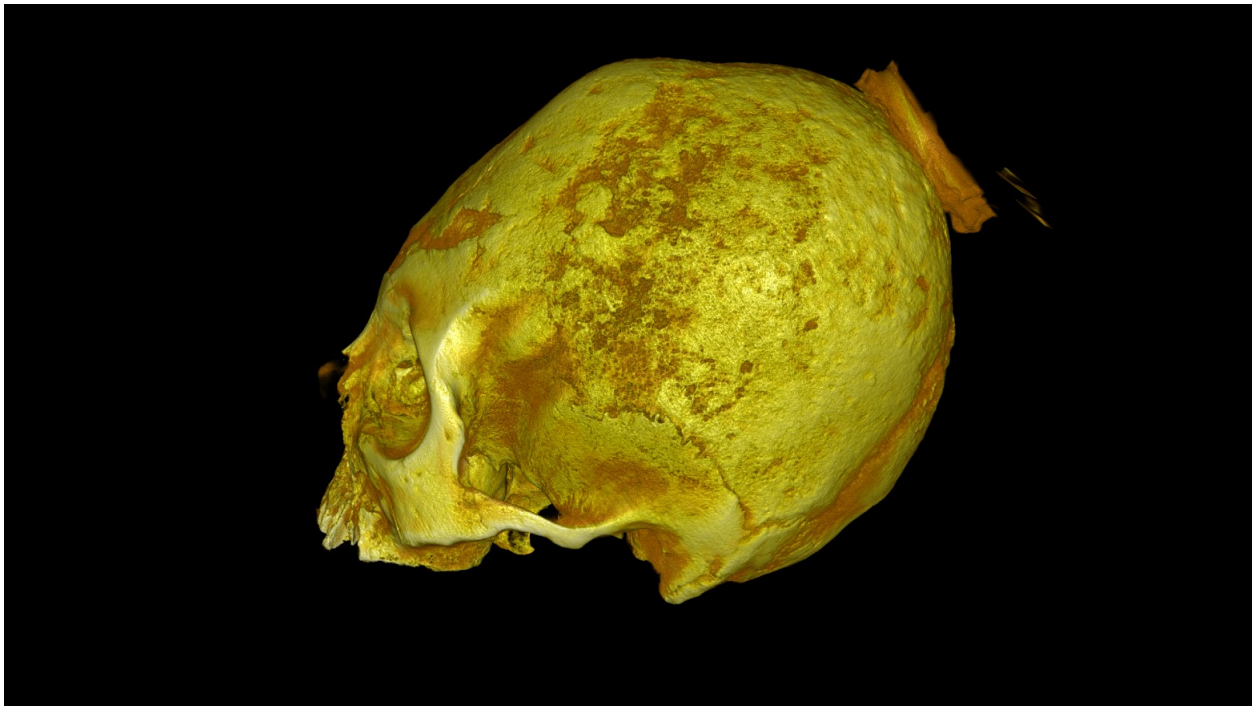
Выглядит это примерно так:



Еще одно направление – изучение последствий воспалительных, инфекционных процессов в костной ткани до применения антибиотиков, в перспективе может быть полезно не только для целей исторических реконструкций, но и современной клинической практики. На томограмме проявления инфекции могут выглядеть очень разнообразно – от

незначительных поверхностных изменений до обширного остеомиелита (гнойного некроза), приводившего к полному разрушению суставов и центральных частей крупных трубчатых костей. Хронические бактериальные инфекции (туберкулез, сифилис) приводили к серьезнейшим разрушениям скелетной системы.

А так выглядит инфекция:



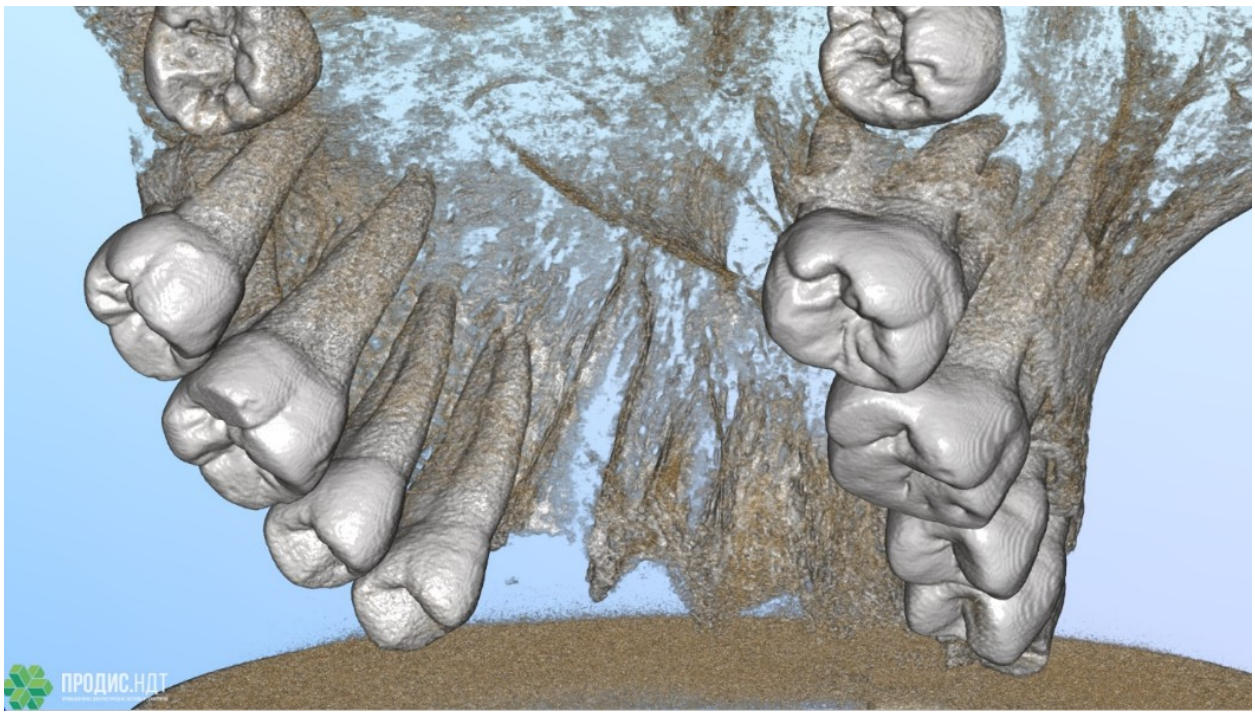
Выводы

Для нас это был интересный опыт. Подержать в руках останки предков 4000 летней давности — непередаваемое ощущение. Также это хороший ответ всяким любителям рептилоидов и пришельцев — вы бы только знали, что древние люди творили с со своими телами в поисках красоты: изменение формы черепа, трепанации, заточенные зубы и прочие прелести.

С технической стороны самое сложное — работа с большим объемом данных. Обычное, медицинское, КТ это 1k кубик в 12 бит, в лучшем случае. А у нас тут 3k...5k в 16 бит. С такими данными только оптимизация ПО для реконструкции и визуализации — еще тот геморрой, что уж говорить про анализ и обработку данных (сегментацию, фильтрацию, структуру).

P.S. Книги Марии Борисовны можно посмотреть и купить в магазине Лабиринт

P.P.S. Дальше мы бы хотели поработать со стоматологами и имплантологами. Если у вас есть интересные задачи — пишите;) Ну и не забывайте о стоматологической гигиене:



P.P.P.S. Спасибо Свете за арт обложку!