

АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-АНТРОПОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Научная статья
УДК 393, 902
doi: 10.17223/2312461X/49/8

Возможности и перспективы применения КТ и микро-КТ в археологических исследованиях

Екатерина Николаевна Бочарова¹
Дарья Валерьевна Кожевникова²
Ксения Анатольевна Колобова³

^{1, 2, 3} *Институт археологии и этнографии СО РАН, Новосибирск, Россия*

¹ *bocharova.e@gmail.com*

² *kozhevnikovadarya@yandex.ru*

³ *kolobovak@yandex.ru*

Аннотация. Компьютерная томография (КТ) и микрокомпьютерная томография (микро-КТ, μ СТ) в настоящий момент являются одними из наиболее продуктивных и перспективных методов неинвазивного анализа артефактов. Они позволяют сохранять археологические объекты, реконструировать, изучать их внутреннюю структуру, визуализировать недоступные при анализе оригинальных артефактов внутренние части, вложения и повреждения объектов без их физического разрушения. Однако в результате недостатков и ограничений метода, КТ достаточно редко используется в практике отечественных или русскоязычных археологических исследований. К недостаткам относятся дороговизна и относительная редкость оборудования, особенно промышленных микротомографов для сканирования образцов в высоком разрешении; необходимость обучения и практики использования оборудования и программного обеспечения для постобработки изображений. Среди ограничений метода следует указать значительную длительность сканирования и большой размер результирующих файлов, что делает крайне сложным исследование массового археологического или палеонтологического материала. При этом в практике зарубежных археологических исследований КТ используется активно, что обуславливает необходимость заимствования полезного опыта. В предлагаемой работе обсуждаются возможности метода КТ для исследования археологических артефактов из различных материалов и периодов. КТ активно используется для исследования артефактов из кости, рога, зубов, камня, керамики, металла, стекла, текстиля, папируса, при изучении рукописей, настенных росписей, фресок, картин и т.д. КТ может использоваться как неразрушающий инструмент оценки возраста и периодов стресса по дентину человека и животных, а также служить инструментом для оценки качества коллагена в костях.

Ключевые слова: компьютерная томография, компьютерная микротомография, костяные и каменные орудия, предметы мобильного искусства, керамика, артефакты из металла, текстиль, стекло

Благодарности: исследование выполнено в рамках проекта № FWZG-2025-0007 «Применение цифровых технологий при анализе археологических источников и реконструкции истории древнейших сообществ».

Для цитирования: Бочарова Е.Н., Кожевникова Д.В., Колобова К.А. Возможности и перспективы применения КТ и микро-КТ в археологических исследованиях // Сибирские исторические исследования. 2025. № 3. С. 152–173. doi: 10.17223/2312461X/49/8

Original article

doi: 10.17223/2312461X/49/8

Possibilities and Prospects of CT and Micro-CT Applications in Archaeological Research

Ekaterina N. Bocharova¹, Darya V. Kozhevnikova²,
Ksenya A. Kolobova³

^{1, 2, 3} *Institute of Archaeology and Ethnography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

¹ *bocharova.e@gmail.com*

² *kozhevnikovadarya@yandex.ru*

³ *kolobovak@yandex.ru*

Abstract. Computed tomography (CT) and computed micro-tomography (micro-CT, μ CT) are currently among the most productive and promising methods of non-invasive artefact analysis. These techniques have enabled the non-destructive preservation of archaeological objects, as well as their reconstruction, study of the internal structure and visualization of internal components, inclusions and damage without the destruction of the object. However, due to the inherent limitations of the method, CT is seldom employed in the context of archaeological research conducted within Russian-speaking communities. The drawbacks inherent to the method include the considerable expense and relative infrequency of the requisite equipment, particularly industrial micro-CT scanners, necessary for the scanning of samples at high resolution. Furthermore, there is a requirement for training and experience in the utilization of both equipment and software for the post-processing of scans. The method's limitations should be specified, including the significant duration of the scanning process and the large size of the resultant files. These factors render the study of mass archaeological or paleontological material extremely difficult. However, CT is actively employed in the practice of foreign archaeological research, which necessitates the borrowing of useful experience. The proposed paper discusses the possibilities of the CT method for the study of archaeological artefacts from different materials and periods. CT is actively used for the study of artefacts made of bone, horn, teeth, stone, ceramics, metal, glass, textiles, and papyrus; in the study of manuscripts, wall paintings, frescoes, paintings, etc. Notably, the CT method can be employed as a non-destructive tool for assessing age and stress periods on human and animal dentin, as well as a tool for assessing the quality of collagen in bone.

Keywords: computed tomography, micro-computed tomography, bone and stone tools, mobile art, ceramics, metal artefacts, textiles, glass

Acknowledgments: The research was carried out as part of the project No. FWZG-2025-0007 “The Application of Digital Technologies in the Analysis of Archaeological Data and the Reconstruction of the Ancient History”.

For citation: Bocharova, E.N., Kozhevnikova, D.V. & Kolobova, K.A. (2025) Possibilities and Prospects of CT and Micro-CT Applications in Archaeological Research. *Sibirskie Istoricheskie Issledovaniia – Siberian Historical Research*. 3. pp. 152–173 (In Russian). doi: 10.17223/2312461X/49/8

Введение

Внедрение новых технологий в археологические исследования требует удовлетворения нескольких условий: 1) обеспечение доступа ученых к новому, обычно дорогостоящему оборудованию; 2) обучение исследователей практическому использованию оборудования и сотрудничество со специалистами, ответственными за эксплуатацию оборудования; 3) понимание, какой научный результат может быть получен при использовании нового оборудования. Часто встречаются ситуации, когда научные организации приобретают приборы, не располагая специалистами, которые могут на них работать. С другой стороны, даже при наличии такого специалиста, обычно технического или естественно-научного профиля, умеющего работать с оборудованием, но не имеющего опыта исследований археологического материала, достаточно сложно определиться с точными целями и задачами исследования.

С подобными трудностями сталкивается практически каждый метод, внедряемый в практику археологических исследований. Так, например, трехмерное моделирование посредством фотограмметрии или сканеров структурированного подсвета до разработки основного инструментария метода исследования артефактов, воспринималось и использовалось как новый способ создания качественных иллюстраций (Грушин, Сосновский 2018). В лучшем случае трехмерные модели использовались как аналоги артефактов, на которых производились метрические измерения (McPherron et al. 2009). По мере развития специальных инструментов исследования археологических образцов стали очевидны возможности трехмерного моделирования. Они включают определение функций археологических артефактов, возможность измерений, которые невозможно провести на самом артефакте, комплексное сравнение форм артефактов и т.д., что в конечном итоге ведет к реконструкции моделей трудового поведения и жизнеобеспечивающих стратегий (Шалагина и др. 2020; Kolobova et al. 2019; Kolobova et al. 2020; Kolobova et al. 2022).

В настоящий момент методы компьютерной томографии (здесь и далее – КТ) и компьютерной микротомографии (здесь и далее – микро-КТ) также находятся практически на начальном этапе своего применения

в отечественной археологии, когда большинство русскоязычных исследователей знают о них, но не осведомлены обо всех возможностях и способах применения. В результате такой ситуации методы очень редко применяются в практике исследований. Целью предлагаемой статьи является обзор возможностей методов КТ и микро-КТ применительно к разным типам археологических артефактов. Для демонстрации возможностей метода в статье приведено несколько примеров его использования на разновременных археологических объектах и верхнеплейстоценовом палеоантропологическом образце.

Метод

Томография – получение послойного изображения внутренней структуры объекта. Рентгеновская КТ предназначена для исследования внутренних структур объектов с помощью рентгеновского излучения, находя применение в медицине, археологии и материаловедении. Микро-КТ – разновидность рентгеновской компьютерной томографии, которая обеспечивает значительно более высокое пространственное разрешение послойных изображений объекта исследования, вплоть до микрометров (менее 1 мкм в некоторых системах) (Elliott, Dover 1982). КТ и микро-КТ широко используются для исследования практически всех видов артефактов, позволяя выявлять внутренние структуры, трещины и следы обработки (Uda et al. 2005; Jansen et al. 2006). Среди существующих томографических методов (магнитно-резонансная томография, нейтронная томография и оптическая когерентная томография) КТ наиболее распространена для исследования археологических образцов.

Основным оборудованием в процессе исследования методом КТ (и микро-КТ) является компьютерный томограф – это прибор, использующий рентгеновское излучение для послойного сканирования объектов. Он состоит из рентгеновской трубки, детекторов, вращающихся вокруг объекта, и компьютерной системы, обрабатывающей полученные данные и создающей трехмерные изображения. Эти изображения, представленные в виде тонких срезов, объединяются в трехмерную модель, которая делает возможным исследование структуры объекта в мельчайших деталях.

Процесс компьютерной томографии включает два основных этапа: сканирование и реконструкция изображения. На первом этапе происходит сканирование объекта с использованием рентгеновского излучения (или другого вида излучения, в зависимости от метода томографии). На втором этапе проводится реконструкция изображения, в процессе которого полученные данные преобразуют в детализированные послойные изображения или трехмерную модель внутренней структуры объекта.

Для иллюстрации примеров использования метода была проведена микро-КТ на базе системы микротомографии высокого разрешения «Продис. Компакт» (модель 1215CG). Данная система предназначена для получения, обработки и хранения цифровых рентгеновских изображений, формируемых источником ионизирующего излучения. Система оснащена плоскопанельным детектором, который регистрирует рентгеновские изображения, и программным обеспечением «ПРОДИС.КОМПАКТ» (версия 1.3.20230802.02664F017, сокращенно ПО proDIS). Данное ПО позволяет получать цифровые радиографические снимки, обрабатывать и сохранять их в базе данных, а также управлять источником рентгеновского излучения и системой перемещения объекта. Основные характеристики детектора: рабочее поле 110 × 140 мм, разрешение 1690 × 2150 пикселей, размер пикселя не более 65 мкм, пространственная разрешающая способность 7 пар лин./мм, энергетический диапазон 10–300 кВ, базовое пространственное разрешение (IQI) не менее D11. Сбор данных проводился с использованием рентгеновской нанофокусной трубки напряжением 100 кВ и параметрами пучка 70 кВ и 400 мкА для всех трех объектов. Сканирование выполнялось при кубических размерах вокселей 45,48 мкм для вкладышевого орудия, 23,46 мкм для зуба и 31,16 мкм для бусины. Было снято 3 600 проекций на 360°. Визуализация и первичная обработка реконструированных томографических данных выполнены в программе «Визуализатор ПРОДИС» (версия 1.3.2). Сегментация материалов, анализ изображений и объемный рендеринг проводились с использованием программного пакета 3D Slicer (версия 5.6.2) (Fedorov et al. 2012) с дополнительным расширением SlicerMorph (Rolfe et al. 2021).

В результате возможности расчета плотности материалов, из которых изготовлены артефакты, при проведении КТ становится возможной процедура сегментации – это процесс присвоения меток вокселям в трехмерных изображениях. В результате сегментации изображение разбивается на части, соответствующие материалам с разной плотностью. Части с разной плотностью можно обособить друг от друга и анализировать отдельно. В данном исследовании сегментирование выполнено в программном пакете 3D Slicer (Fedorov et al. 2012). В исследованиях археологических артефактов, особенно композитных, сегментация является одной из наиболее востребованных процедур.

Материалы

Первая КТ мумии была проведена в 1977 г. в Королевском музее Онтарио (Канада) (Сох 2015). Эту дату можно считать началом использования метода в антропологии и археологии. В работе намеренно не приводятся примеры применения КТ в антропологии, поскольку применение

метода в этой области имеет, скорее, естественно-научную направленность, и уже накоплен значительный объем исследований, который не может войти в рамки статьи. В отличие от археологии, применение КТ в антропологии уже широко распространено в отечественных исследованиях.

Артефакты и образцы из кости и рога. КТ открывает доступ к изучению внутренней структуры костей и костяных орудий (Bradfield 2013; Bradfield et al. 2016; Baumann et al. 2023; Li et al. 2020; Orłowska et al. 2023). В исследовании Д. Брэдфилда экспериментальные образцы подвергались нагрузкам, аналогичным тем, что могли испытывать археологические орудия, включая проколы шкур, удары и постдепозиционные повреждения. Микро-КТ позволила визуализировать микротрещины и определить их антропогенное или естественное происхождение. Результаты показали, что определенные трудовые операции создают характерные микроструктурные повреждения, что может служить одним из методов определения функций древних костяных орудий (Bradfield 2013; Bradfield 2016). Анализ среднепалеолитических костяных орудий со стоянки Ше-Пино (Франция) методом микро-КТ позволил выявить структурные изменения, связанные с их использованием, и определить силу, направление ударов и характер эксплуатации этих предметов (Baumann et al. 2023).

Помимо орудий из кости, КТ используется и для детального изучения структуры и следов обработки предметов неутилитарного значения. Этот метод позволил получить высокоточные 3D-изображения верхнепалеолитической фигурки птицы, найденной на стоянке Линцзин в Китае, и проанализировать технологию ее изготовления. Томография показала, что фигурка возрастом 13,5 тыс. л. была вырезана из фрагмента эпифиза кости млекопитающего, который подвергли нескольким этапам обработки в процессе формообразования (Li et al. 2020).

Также КТ обеспечивает возможность исследования предметов из рога. Анализ послойных изображений среднепалеолитического рогового отбойника из микокской пещеры Бичник (Польша) выявил значительный износ, многочисленные вмятины, надрезы и внутренние трещины. Сравнение с экспериментальными образцами показало, что следы износа характерны для инструментов, использовавшихся при обработке камня (Orłowska et al. 2023).

Как неразрушающий метод КТ может использоваться для предварительной оценки костей перед радиоуглеродным анализом на предмет сохранности коллагена. Исследования показали, что пористость кортикальной кости – процент от общего объема кости, состоящий из пустого пространства, рассчитанный с помощью анализа снимков, может служить косвенным показателем сохранности костного коллагена. Первоначально эти данные были получены для костей крупного рогатого скота

и овец (Tripp et al. 2010), а затем метод начал применяться к человеческим останкам (Beck et al. 2012; Tripp et al. 2018). До применения КТ все методы оценки сохранности коллагена были деструктивными.

На основе метода микро-КТ был опробован неразрушающий способ определения возраста животных/индивидов по инкрементным линиям в дентине зубов, не требующий обычного для таких исследований разрушения образцов. Первоначально метод оценки возраста по слоистым структурам зубов использовался в зоологии для определения возраста и сезона смерти животных, а позднее был адаптирован для исследования человеческих зубов. Микро-КТ изображения позволяют проводить автоматизированный анализ толщины слоев для определения возраста и выявления стрессовых периодов в жизни человека (Tanner et al. 2021; Müller et al. 2022). Такое исследование находится на стыке антропологии, популяционной статистики и археологии, поскольку в качестве стрессовых периодов фиксируются эпизоды голода, болезни и беременности.

Изделия из камня. Протокол StyroStone для 3D-сканирования каменных артефактов с использованием микро-КТ и лазерных сканеров позволил значительно ускорить и улучшить процесс цифровой обработки каменных орудий. С помощью микро-КТ удалось отсканировать 220 артефактов за один сеанс с высокой точностью, что позволило получить детальные трехмерные модели, которые сохранили острые углы и мелкие детали. В процессе не возникло проблем с полупрозрачными зонами, которые сложно фиксировать 3D-сканерами. Сравнение результатов микро-КТ с результатами лазерного сканирования показало схожую точность, что подтверждает надежность метода (Göldner et al. 2022).

Микро-КТ использовалась для анализа повреждений, возникающих на экспериментальных кварцевых орудиях в результате их применения в качестве наконечников стрел и копий. Метод позволил получить детальные трехмерные данные и выявить на 33% больше повреждений по сравнению с визуальным исследованием макроследов с бинокуляра. Несмотря на то, что эти дополнительные данные не изменили основных интерпретаций, они повысили точность измерений и статистическую значимость различий между разными типами дистанционного вооружения (Pargeter et al. 2017).

Изделия из керамики. Керамика также является подходящим для КТ объектом, поскольку метод визуализирует внутренние микротрещины, слои, технологические особенности и температуру обжига (Kahl, Ramming 2012; McKenzie-Clark, Magnussen 2014; Гурьева и др. 2023; Журавлев и др. 2024). Микро-КТ применили для изучения микроструктуры керамических фрагментов со стоянки Гамбург-Боберг-15 (мезолит-неолит, Северная Германия). Были определены органические остатки, которые полностью сгорели в процессе обжига, но оставили пустоты в тесте, а также изучены минеральные примеси в глине. Помимо этого,

анализ пористости материала (ориентация пор в тесте сосуда) позволил определить технику формовки сосудов (Kahl, Ramminger, 2012).

В российских исследованиях метод КТ уже используется при изучении особенностей производства керамических сосудов (например, Гурьева и др. 2023; Журавлев и др. 2024). По мнению В.Г. Ломана, применение КТ при анализе керамики дает возможность оценивать плотность различных участков, точно измерять размеры отдельных элементов, включая минеральные примеси, и определять метрические параметры сосуда, а также строить виртуальные сечения сосудов в любой плоскости (Ломан 2020). В другом отечественном исследовании проведена КТ скульптурного изображения головы мужчины, найденного на дне Керченской бухты. Исследования терракотовой скульптуры позволили установить, что изделие было создано методом скульптурной лепки с последовательным добавлением профильных деталей. Кроме того, КТ выявила внутренние пустоты и щели, не совпадающие с рельефом поверхности, а также наличие свинцового напыла, свидетельствующего о креплении изделия к основе (Ковальчук и др. 2020).

Изделия из металла. КТ позволяет выявлять особенности и дефектыковки, а также реконструировать процессы инкрустации и коррозии в металлических артефактах (Re et al. 2015; Stelzner et al. 2016; Зайцева и др. 2023). Исследование комплекса из 100 мечей из раннесредневекового клада из Лауххайм (Германия) показало, что КТ помогает быстро и точно документировать особенности мечей, включая текстурыковки. Анализ позволил выявлять ключевые характеристики клинка, такие как узорное сваривание, железные вставки и переход сварных прутьев в хвостовик (Stelzner et al. 2016). С помощью томографии восстановлена последовательность технологических операций, применявшихся для изготовления серебряных браслетов из Исадского клада (конец XI – начало XII в. н.э.). Было установлено, что браслеты сделаны из плетеных жгутов с напаянными по концам пластинчатыми коваными площадками, на которых при помощи расклепанных шпенокков прикреплены литые выпуклые наконечники (Зайцева и др. 2023).

Использование неразрушающей КТ позволяет идентифицировать металлические предметы с сильной коррозией, например кресты, монеты и зеркала (Bozzini et al. 2014; Smeriglio et al. 2023). Исследование римских монет из Грота делле Нинфе (Италия), покрытых толстым слоем коррозии, было направлено на попытку восстановления надписей. С помощью рентгенофлуоресцентного анализа и микро-КТ удалось определить состав металла монет и восстановить скрытые надписи. Благодаря этому установлено, что монеты относятся к периоду от 7 г. до н.э. до 101 г. н.э. (Smeriglio et al. 2023).

Изделия из стекла. Древние стеклянные изделия часто имеют сложную внутреннюю структуру, которую практически невозможно исследовать традиционными методами. Применение КТ позволяет фиксировать пузыри воздуха, включения и другие дефекты (Jansen et al. 2006; Nykonenko et al. 2023; Liao et al. 2024). КТ применена для анализа предметов, обнаруженных в римском захоронении у города Бохольц (Германия), включая стекло и металл. При анализе артефактов в настолько плохой сохранности, что их невозможно было извлечь из грунта, исследователи применили метод микро-КТ для предварительно извлеченных блоков грунта с артефактами внутри, в результате чего удалось точно идентифицировать все объекты. Микро-КТ позволила определить форму, количество и расположение в погребальной камере стеклянных тарелок, мисок, бутылок и кувшинов, а также бронзовых и серебряных столовых приборов (Jansen et al. 2006).

Микро-КТ используется для анализа состава и технологии производства стеклянных бусин (Yang et al. 2013; Cheng et al. 2019; Nykonenko et al. 2023; Liao et al. 2024), в том числе древнекитайских типа «глаз стрекозы». Эти бусины были найдены в гробницах Шэньминпу в провинции Хэнань (475–221 гг. до н.э.), а также в захоронениях могильника Шампула в Синьцзян-Уйгурском автономном районе (IV в. н.э.) (Китай). Было установлено, что они создавались методом инкрустации одного типа стекла в другой, что стало важным шагом в реконструкции процесса их изготовления (Cheng et al. 2019). Мануальное сегментирование КТ изображений бусин позволило определить различные варианты их производства. Были определены «одинарный» и «двойной зрачок», т.е. бусины, созданные путем однократной или двукратной инкрустации. Сегментирование оказалось крайне трудоемким процессом, в результате чего был предложен автоматизированный метод сегментации и 3D-реконструкции на основе машинного обучения (Liao et al. 2024).

Изделия из дерева. КТ и микро-КТ позволяют идентифицировать породы дерева по фрагментам образцов, углям и коре. Анализ ростовых колец внутри образцов позволяет проводить неразрушающее датирование (например, Bill et al. 2012; Stelzner, Million 2015; Kimball et al. 2024). Метод также применим для анализа плетеных изделий (Andonova 2021).

Текстиль. КТ позволяет изучать сохранившиеся ткани без необходимости физического вмешательства. Это особенно важно для текстиля, который сохранился в сложных условиях (например, в мумиях). Томография помогает исследовать тип плетения, плотность волокон, толщину нитей, а также выявлять возможные следы красителей и других типов обработки (Serrano et al. 2021; Iacconi et al. 2023; Karjalainen et al. 2023; Lipkin et al. 2023; Шишлина и др. 2024).

Исследование фрагмента шелкового текстиля из средневекового захоронения могильника Манджикины-2 (середина XIII в. н.э., Калмыкия)

позволило воссоздать золотые нити в переплетении и уточнить элементы исходного орнамента (Шишлина и др. 2024). В погребениях Вальмаринниemi (XIII–XIV вв. н.э., Финляндия) были обнаружены самые ранние находки из хлопка в регионе, определение и анализ структуры которого обеспечила КТ. С помощью КТ (сегментация модели) было проведено виртуальное удаление загрязнений с текстиля, благодаря чему был реконструирован узор тканого пояса (Lipkin et al. 2023).

Папирусы. Ценные научные результаты были получены при исследовании артефактов, которые невозможно исследовать традиционными методами ввиду их плохой сохранности. Свитки папирусов, найденные на стоянке Вилла Папирусов в Геркулануме (79 г. н.э., Италия), были обуглены, что делало их крайне хрупкими, а попытки открытия часто приводили к разрушению. Фазово-контрастная рентгеновская томография позволила ученым «виртуально развернуть» свитки, не повреждая их. Этот метод помог исследователям впервые расшифровать значительные фрагменты древнегреческих текстов, включая произведения философа-эпикурейца Филодема из Гадары (Mocella et al. 2015; Tack et al. 2016; Parsons et al. 2023).

Применение КТ помогает исследователям выявлять скрытые слои и изображения в рукописях, настенных росписях, фресках, картинах и других предметах искусства, следы закрашивания или повреждений (например, Friml et al. 2014; Re et al. 2015; Sallam et al. 2019; Bossema et al. 2024).

Композитные артефакты или образцы с артефактами внутри. КТ позволяет различать на послойных изображениях материалы с разной плотностью, что делает этот метод незаменимым при исследовании образцов, состоящих из разного сырья, либо артефактов, включающих внутри себя другие объекты, иногда неожиданные для исследователей.

Изучение «ледяного человека» Этци, найденного в Альпах (граница Австрии – Италии, 5300 л.н. по ^{14}C) показало, что он погиб от ранения стрелой – наконечник был обнаружен между грудной клеткой и левой лопаткой (Murphy et al. 2003). С помощью КТ были изучены мумии крокодилов, которые создавались в качестве жертвенных подношений, обнаруженные в гробнице в Куббат аль-Хава (Египет). КТ позволила выявить внутри одного из крокодилов рыболовный крючок, что, возможно, стало причиной его смерти (McKnight et al. 2024).

КТ используется для неразрушающего изучения вложенных предметов. Данные томографии позволили визуализировать внутреннюю структуру клада монет в керамическом сосуде из Йоркшира (Великобритания), определить взаимное расположение монет и идентифицировать скрытые экземпляры без их извлечения. Все монеты были сегментированы и идентифицированы: серебряные денарии, датированные периодом с 3 г. до н.э. по 181 г.

н.э. Впоследствии сотрудники Британского музея извлекли монеты, подтвердив их идентификацию, выполненную ранее с помощью КТ (Miles et al. 2016). Подобным примером являются неолитические костяные игольники из Верховенского могильника (Прибайкалье) с сохранившимися рыхлыми отложениями внутри. Микро-КТ продемонстрировала наличие внутри игольников костяных игл, чье положение, параллельно стенкам игольников, свидетельствует об использовании кожаных шнурков при использовании и транспортировке. Подобный способ зафиксирован на памятниках железного века и в современной этнографии Северо-Восточной Азии (Kozhevnikova et al. 2025).

Примеры применения КТ для исследования археологических артефактов

Одним из наиболее удобных для демонстрации метода типов артефактов являются композитные орудия, состоящие из каменных вкладышей, вложенных в костяную или роговую рукоять (Казачка-1, Красноярский край, граница плейстоцен-голоцена) (рис. 1. *А*). При исследовании использовался метод пороговой сегментации, позволяющий выделить материалы разной плотности. В случае значительной разницы плотностей объектов используются автоматические инструменты, но при подобной друг другу плотности материалов может потребоваться дополнительная ручная корректировка границ. Для составного орудия со стоянки Казачка-1 было успешно выполнено сегментирование вкладышей из костяной рукояти (рис. 1, 2–3). Программный пакет 3D Slicer автоматически выделил две области: кость и камень, однако пустое пространство паза также было определено как часть объекта. Далее в ручном режиме были уточнены границы каждого из четырех вкладышей. В результате экспортированы трехмерные модели вкладышей и одна модель костяной основы с пустым пазом. Необходимые измерения можно проводить встроенными инструментами в программах для анализа КТ-изображений или для работы с 3D-моделями. При необходимости виртуальные артефакты можно распечатать и работать с физическими копиями (Бочарова и др. 2025).

Вторым примером для демонстрации возможности КТ с целью исследования невидимых полостей был взят нижний правый премоляр неандертальца из комплекса Чагырской пещеры (60 тыс. л.н., Алтай) с асимметричной стертой коронкой. Внутренний канал премоляра хорошо виден на скане (рис. 2, *А*).

В качестве третьего примера была взята бусина из сердолика из могильника Усть-Эдиган (гунно-сарматское время, Горный Алтай) (рис. 2, *Б*). Особый интерес для данной категории находок имеет внутреннее отверстие, которое хорошо визуализируется на КТ-изображениях и виртуальной модели.

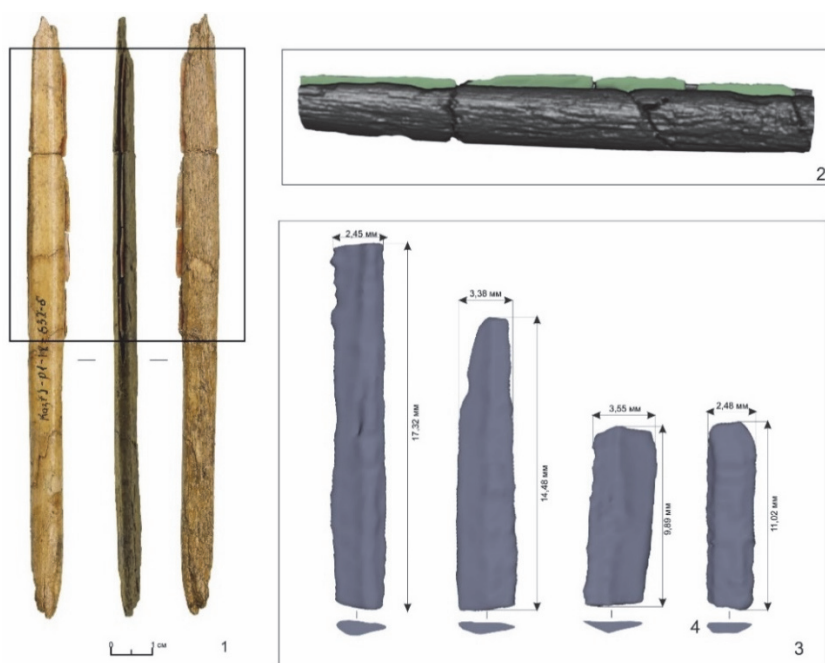


Рис. 1. Составное пазовое орудие со стоянки Казачка (ранний голоцен, Красноярский край): 1 – общий вид, фото; 2 – процесс сегментации каменных вкладышей в костяной рукояти; 3 – сегментированные каменные вкладыши, 3D-модели

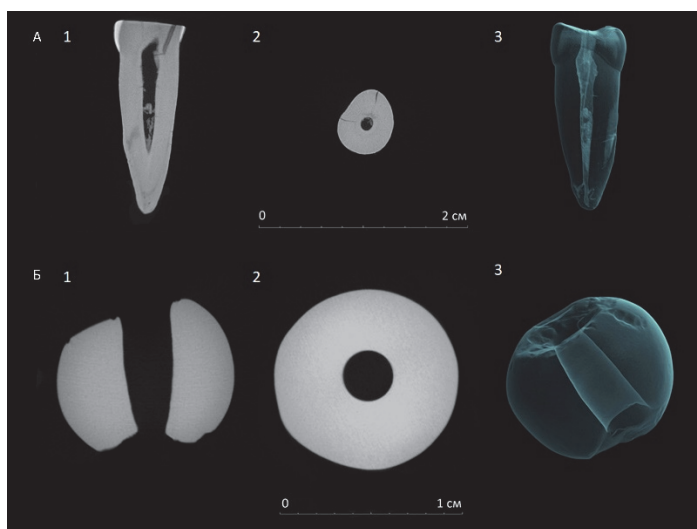


Рис. 2. Изображения, полученные в результате КТ:
 А – нижний правый премоляр неандертальца из комплекса Чагырской пещеры (60 тыс. л.н., Алтай); Б – бусина из сердолика из могильника Усть-Эдиган (гунно-сарматское время, Горный Алтай):
 1 – срез вдоль, 2 – срез поперек, 3 – 3D-модель

Данный метод позволяет рассчитать объем внутреннего отверстия и реконструировать процесс его производства. Такое длинное и узкое отверстие невозможно визуализировать методами трехмерного моделирования.

Заключение

Компьютерная томография является относительно новым инструментом для анализа археологических артефактов, который предоставляет исследователям недоступные ранее возможности для неинвазивных исследований. Традиционные методы анализа текстиля для идентификации волокон, дентина для определения сезонности смерти, оценки качества коллагена, состава керамики и металлических изделий требуют физического вмешательства и иногда даже уничтожения артефактов. Одним из главных преимуществ компьютерной томографии является высокая точность, особенно при использовании микрофокусной томографии, которая позволяет выявлять мельчайшие детали, такие как микроповреждения. Технология трехмерной реконструкции КТ-изображений создает высококачественные цифровые модели, что частично дублирует функции фотограмметрии и трехмерного моделирования. Однако трехмерное сканирование или фотограмметрия не предоставляют доступ к внутренней структуре артефактов. Сегментация, которую можно выполнить только на основе КТ-изображений, является наиболее многообещающим направлением исследования композитных или сложных артефактов.

Перспективы развития метода связаны с автоматизацией анализа при помощи машинного обучения, это позволит значительно ускорить обработку данных и повысить ее точность. Интеграция КТ с химическими и спектроскопическими методами откроет новые возможности для исследования состава артефактов, а усовершенствованные алгоритмы реконструкции позволят точнее восстанавливать утраченные части древних объектов и моделировать их использование. Важным направлением остается создание общедоступных 3D баз данных артефактов, что способствует развитию науки и образования.

Список источников

- Бочарова Е.Н., Кожевникова Д.В., Колобова К.А. Метод компьютерной микротомографии для изучения составных пазовых орудий // *Stratum Plus*. 2025. № 1. С. 285–300. doi: 10.55086/sp251285300
- Грушин С.П., Сосновский И.А. Фотограмметрия в археологии – методика и перспективы // *Теория и практика археологических исследований*. 2018. Т. 21, № 1. С. 99–105. doi: 10.14258/tpai(2018)1(21).-08
- Гурьева П.В., Журавлев Д.В., Коваленко Е.С., Терещенко Е.Ю., Яцишина Е.Б. Фигурный сосуд в виде пантеры из Пантикапея – взгляд вовнутрь // *Археологические вести*. 2023. № 41. С. 180–188. doi: 10.31600/1817-6976-2023-41-180-188

- Журавлев Д.В., Гурьева П.В., Коваленко Е.С., Терещенко Е.Ю., Яцишина Е.Б. Кипрские фигурные сосуды эпохи бронзы из собрания Государственного исторического музея: взгляд внутрь // Вестник древней истории. 2024. Т. 84, № 2. С. 275–299. doi: 10.31857/S0321039124020027
- Зайцева И.Е., Коваленко Е.С., Гурьева П.В., Мандрыкина А.В., Кондратьев О.А., Исмагулов А.М., Подурец К.М., Терещенко Е.Ю., Яцишина Е.Б. Три браслета из Исадского клада 2021 г.: технология изготовления и состав металла // КСИА. 2023. № 272. С. 356–376. doi: .25681/IA5A6.0130-2620.272.356-376
- Ковальчук М.В., Яцишина Е.Б., Макаров Н.А., Грешиников Э.А., Анциферова А.А., Гунчина О.Л., Кашикарв П.К., Коваленко Е.С., Мурашев М.М., Ольховский С.В., Подурец К.М., Тимеркаев В.Б. Томографические исследования терракотовой головы из Керченской бухты // Кристаллография. 2020. Т. 65, № 5. С. 832–838. doi: 10.31857/S0023476120050124
- Ломан В.Г. Рентгеновская компьютерная томография в изучении древних керамических сосудов // КСИА. 2020. Вып. 259. С. 425–435. doi: 10.25681/IARAS.0130-2620.259.425-434
- Шалагина А.В., Колобова К.А., Чистяков П.В., Кривошапкин А.И. Применение трехмерного геометрико-морфометрического анализа для изучения артефактов каменного века // Stratum plus. 2020. № 1. С. 343–358.
- Шишлина Н.И., Орфинская О.В., Леонова Н.В., Лобода А.Ю., Коваленко Е.С., Гурьева П.В., Кондратьев О.А., Кожухова Е.И., Мандрыкина А.В., Терещенко Е.Ю., Яцишина Е.Б. Новые подходы к анализу средневекового текстиля методами исторического материаловедения // КСИА. 2024. Вып. 276. С. 312–327. doi: 10.25681/IA5A6.0130-2620.276.312-327
- Andonova M. Ancient basketry on the inside: X-ray computed microtomography for the non-destructive assessment of small archaeological monocotyledonous fragments: examples from Southeast Europe // Heritage Science. 2021. Vol. 9: 158. doi: 10.1186/s40494-021-00631-z
- Baumann M., Plisson H., Maury S., Renou S., Coqueugnot H., Vanderesse N., Kolobova K., Shmaider S., Rots V., Gue'rin G., Rendu W. On the Quina side: A Neanderthal bone industry at Chez-Pinaud site, France // PLoS ONE. 2023. № 18 (6): e0284081. doi: 10.1371/journal.pone.0284081
- Beck L., Cuif J.-P., Pichon L., Vaubailion S., Dambricourt Malassé A., Abel R.L. Checking collagen preservation in archaeological bone by non-destructive studies (Micro-CT and IBA) // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2012. № 273. P. 203–207. doi: 10.1016/j.nimb.2011.07.076
- Bill J., Daly A., Johnsen Ø., Dalen K.S. DendroCT – dendrochronology without damage // Dendrochronologia. 2012. Vol. 30, № 3. P. 223–230. doi: 10.1016/J.DENDRO.2011.11.002
- Bossemma F.G., Palenstijn W.J., Heginbotham A., Corona M., van Leeuwen T., van Liere R., Dorscheid J., O'Flynn D., Dyer J., Hermens E., Batenburg K.J. Enabling 3D CT-scanning of cultural heritage objects using only in-house 2D X-ray equipment in museums // Nature Communications. 2024. Vol. 15 (1): 3939. doi: 10.1038/s41467-024-48102-w
- Bozzini B., Gianoncelli A., Mele C., Siciliano A., Mancini L. Electrochemical reconstruction of a heavily corroded Tarentum hemibolus silver coin: a study based on microfocus X-ray computed microtomography // Journal of Archaeological Science. 2014. Vol. 52. P. 24–30. doi: 10.1016/j.jas.2014.08.002
- Bradfield J. Fracture analysis of bone tools: a review of the micro-CT and macrofracture methods for studying bone tool function // Close to the bone: current studies in bone technologies / ed. by S. Vitezovic. Belgrade, 2016. P. 71–79.
- Bradfield J. Investigating the potential of micro-focus computed tomography in the study of ancient bone tool function: results from actualistic experiments // Journal of Archaeological Science. 2013. Vol. 40, № 6. P. 2606–2613. doi: 10.1016/j.jas.2013.02.007

- Bradfield J., Hoffman J., De Beer F. Verifying the potential of micro-focus X-ray computed tomography in the study of ancient bone tool function // *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2016. Vol. 5. P. 80–84. doi: 10.1016/j.jasrep.2015.11.001
- Cheng Q., Zhang X., Guo J., Wang B., Lei Y., Zhou G., Fu Y. Application of computed tomography in the analysis of glass beads unearthed in Shanpula cemetery (Khotan), Xinjiang Uyghur Autonomous Region // *Archaeological and Anthropological Science*. 2019. Vol. 11 (1). P. 937–945. doi: 10.1007/s12520-017-0582-6
- Cox S.L. A critical look at mummy CT scanning // *The Anatomical Record*. 2015. № 298. P. 1099–1110. doi: 10.1002/ar.23149
- Elliott J.C., Dover S.D. X-ray microtomography // *Journal of Microscopy*. 1982. Vol. 126 (2). P. 211–213. doi: 10.1111/j.1365-2818.1982.tb00376.x
- Fedorov A., Beichel R., Kalpathy-Cramer J., Finet J., Fillion-Robin J.-C., Pujol S., Bauer C., Jennings D., Fennessy F.M., Sonka M., Buatti J., Aylward S. R., Miller J.V., Pieper S., Kikinis R. 3D Slicer as an image computing platform for the quantitative imaging network // *Magnetic Resonance Imaging*. 2012. Vol. 30 (9). P. 1323–1341. doi: 10.1016/j.mri.2012.05.001
- Friml J., Procházková K., Melnyk G., Zikmund T., Kaiser J. Investigation of Cheb relief intarsia and the study of the technological process of its production by micro computed tomography // *Journal of Cultural Heritage*. 2014. Vol. 15 (6). P. 609–613. doi: 10.1016/j.culher.2013.12.006
- Göldner D., Karakostis F.A., Falcucci A. Practical and technical aspects for the 3D scanning of lithic artefacts using micro-computed tomography techniques and laser light scanners for subsequent geometric morphometric analysis. Introducing the StyroStone protocol // *PLoS ONE*. 2022. № 17 (4): e0267163. doi: 10.1371/journal.pone.0267163
- Iacconi C., Autret A., Desplanques E., Chave A., King A., Fayard B., Moulherat C., Leccia É., Bertrand L. Virtual technical analysis of archaeological textiles by synchrotron microtomography // *Journal of Archaeological Science*. 2023. Vol. 149: 105686. doi: 10.1016/j.jas.2022.105686
- Jansen R.J., Poulus M., Kottman J., de Groot T., Huisman D.J., Stoker J. CT: A new nondestructive method for visualizing and characterizing ancient Roman glass fragments in situ in blocks of soil // *Radiographics*. 2006. Vol. 26, № 6. P. 1837–1844. doi: 10.1148/rg.266065079
- Kahl W.-A., Ramminger B. Non-destructive fabric analysis of prehistoric pottery using high-resolution X-ray microtomography: a pilot study on the late Mesolithic to Neolithic site Hamburg-Boberg // *Journal of Archaeological Science*. 2012. № 39 (7). P. 2206–2219. doi: 10.1016/j.jas.2012.02.029
- Karjalainen V.-P., Finnilä M.A.J., Salmon P.L., Lipkin S. Micro-computed tomography imaging and segmentation of the archaeological textiles from Valmarinniemi // *Journal of Archaeological Science*. 2023. Vol. 160:105871. doi: 10.1016/j.jas.2023.105871
- Kimball J.J.L., With R., Rødsrud C.L. A new and ‘riveting’ method: Micro-CT scanning for the documentation, conservation, and reconstruction of the Gjellestad Ship // *Journal of Cultural Heritage*. 2024. Vol. 66 (378). P. 76–85. doi: 10.1016/j.culher.2023.11.003
- Kolobova K., Kharevich V., Chistyakov P., Kolyasnikova A., Kharevich A., Markin S., Krivoschapkin A., Baumann M., Olsen J.W. How Neanderthals gripped retouchers: experimental reconstruction of the manipulation of bone retouchers by Neanderthal stone knappers // *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2022. Vol. 14. P. 1–10. doi: 10.1007/s12520-021-01495-x
- Kolobova K., Rendu W., Shalagina A., Chistyakov P., Kovalev V., Baumann M., Kolyasnikova A., Krivoschapkin A. The application of geometric-morphometric shape analysis to Middle Paleolithic bone retouchers from the Altai Mountains, Russia // *Quaternary International*. 2020. Vol. 559 (7). P. 89–96. doi: 10.1016/j.quaint.2020.06.018
- Kolobova K.A., Fedorchenko A.Y., Basova N.V., Postnov A.V., Kovalev V.S., Chistyakov P.V., Molodin V.I. The use of 3D-modeling for reconstructing the appearance and function of

- non-utilitarian items (the case of anthropomorphic figurines from Tourist-2) // *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*. 2019. № 4 (47). P. 66–76. doi: 10.17746/1563-0110.2019.47.4.066-076
- Kozhevnikova D.V., Chistykov P.V., Kolobova K.A., Zotkina L.V. From neolithic to contemporary times: persistent use patterns of needle cases in Northeast Asia // *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2025. Vol. 17, № 192. doi: 10.1007/s12520-025-02304-5
- Li Z., Doyon L., Fang H., Ledevin R., Queffelec A., Raguin E., d'Errico F. A Paleolithic bird figurine from the Lingjing site, Henan, China // *PLoS ONE*. 2020. № 15 (6): e0233370. doi: 10.1371/journal.pone.0233370
- Liao L., Cheng Q., Zhang X., Qu L., Liu S., Ma S., Chen K., Liu Y., Wang Y., Song W. Segmentation and visualization of the Shampula dragonfly eye glass bead CT images using a deep learning method // *Heritage Science*. 2024. Vol. 12: 381. doi: 10.1186/s40494-024-01505-w
- Licata M., Borgo M., Armocida G., Nicosia L., Ferioli E. New paleoradiological investigations of ancient human remains from North West Lombardy archaeological excavations // *Skeletal Radiology*. 2016. № 45. P. 323–331. doi: 10.1007/s00256-015-2266-6
- Lipkin S., Karjalainen V.-P., Puolakka H.-L., Finnilä, M.A.J. Advantages and limitations of micro-computed tomography and computed tomography imaging of archaeological textiles and coffins // *Heritage Science*. 2023. Vol. 11. P. 1–15. doi: 10.1186/s40494-023-01076-2
- McKenzie-Clark J., Magnussen J. Dual energy computed tomography for the non-destructive analysis of ancient ceramics // *Archaeometry*. 2014. № 56 (4). P. 573–590. doi: 10.1111/arc.12035
- McKnight L.M., Bibb R., Cooper F. Seeing is believing – The application of Three-Dimensional modelling technologies to reconstruct the final hours in the life of an ancient Egyptian Crocodile // *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2024. № 34: e00356. doi: 10.1016/j.daach.2024.e00356
- McPherron S.P., Gernat T., Hublin J.J. Structured light scanning for high-resolution documentation of in situ archaeological finds // *Journal of Archaeological Science*. 2009. Vol. 36 (1). P. 19–24. doi: 10.1016/j.jas.2008.06.028
- Miles J., Mavrogordato M., Sinclair I., Hinton D., Boardman R., Earl G. The use of computed tomography for the study of archaeological coins // *Journal of Archaeological Science Reports*. 2016. Vol. 6. P. 35–41. doi: 10.1016/j.jasrep.2016.01.019
- Mocella V., Brun E., Ferrero C., Delattre D. Revealing letters in rolled Herculaneum papyri by X-ray phase-contrast imaging // *Nature Communications*. 2015. Vol. 6, № 1: 5895. doi: 10.1038/NCOMMS6895
- Müller B., Stiefel M., Rodgers G., Humbel M., Osterwalder M., Jackowski J. von Hotz G., Velasco Guadarrama A.A., Bunn H.T., Scheel M., Weitkamp T., Schulz G., Tanner C. Three-Dimensional Imaging and Analysis of Annual Layers in Tree Trunk and Tooth Cementum // *Conference: Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication XII*. 2022. Vol. 12041:120410C. doi: 10.1117/12.2615148
- Murphy W.A., zur Nedden D., Gostner P., Knapp R., Recheis W., Seidler H. The Iceman: discovery and imaging // *Radiology*. 2003. № 226. P. 614–629. doi: 10.1148/radiol.2263020338
- Nykonenko D., Yatsuk O., Guidorzi L., Lo Giudice A., Tansella F., Cesareo L.P., Sorrentino G., Davit P., Gulmini M., Re A. Glass beads from a Scythian grave on the island of Khortytsia (Zaporizhzhia, Ukraine): insights into bead making through 3D imaging // *Heritage Science*. 2023. Vol. 11:238. doi: 10.1186/s40494-023-01078-0
- Orłowska J., Cyrek K., Kaczmarczyk G.P., Migal W., Osipowicz G. Rediscovery of the Palaeolithic antler hammer from Biskup Cave, Poland: New insights into its chronology, raw material, technology of production and function // *Quaternary International*. 2023. № 665–666 (1). P. 48–64. doi: 10.1016/j.quaint.2022.08.011

- Pargeter J., Bam L., de Beer F., Lombard M. Microfocus X-ray tomography as a method for characterising macro-fractures on quartz backed tools // *The South African Archaeological Bulletin*. 2017. Vol. 72, № 206. P. 148–155.
- Parsons S., Parker C.S., Chapman C., Seales W.B. EduceLab-scrolls: Verifiable recovery of text from Herculaneum papyri using X-ray CT // *arXiv preprint*. 2023. doi: 10.48550/arXiv.2304.02084
- Re A., Corsi J., Demmelbauer M., Martini M., Mila G., Ricci C. X-ray tomography of a soil block: a useful tool for the restoration of archaeological finds // *Heritage Science*. 2015. Vol. 3 (4). P. 1–7. doi: 10.1186/s40494-015-0033-6
- Rolfe S., Pieper S., Porto A., Diamond K., Winchester J., Shan S., Kirveslahti H., Boyer D., Summers A., Maga A. M. SlicerMorph: an open and extensible platform to retrieve, visualize and analyze 3D morphology // *Methods in Ecology and Evolution*. 2021. Vol. 12 (7). P. 1816–1825. doi: 10.1111/2041-210X.13669
- Sallam A., Hemeda S., Toprak M., Muhammed M., Hassan M., Uheida A. CT scanning and MATLAB calculations for preservation of coptic mural paintings in historic Egyptian monasteries // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9 (1): 3903. doi: 10.1038/s41598-019-40297-z
- Serrano A., Meijer S., van Rijn R.R., Coban S.B., Reissland B., Hermens E., Batenburg K.J., van Bommel M. A non-invasive imaging approach for improved assessments on the construction and the condition of historical knotted-pile carpets // *Journal of Cultural Heritage*. 2021. Vol. 47. P. 79–88. doi: 10.1016/j.culher.2020.09.012
- Smeriglio A., Filosa R., Crocco M. C., Vincenzo C., Formoso V., Cristoforo R., Solano B.A., Cerzoso M., Polosa A., Cerrone V., Agostino R.G. A numismatic study of Roman coins through X-ray fluorescence and X-ray computed μ -tomography analysis // *Acta IMEKO*. 2023. Vol. 12, № 4. P. 1–7. doi: 10.21014/actaimeko.v12i4.1504
- Stelzner J., Gauß F., Schuetz P. X-ray computed tomography for non-destructive analysis of early Medieval swords // *Studies in Conservation*. 2016. № 61 (2). P. 86–101. doi: 10.1179/2047058414Y.0000000157
- Stelzner J., Million S. X-ray computed tomography for the anatomical and dendrochronological analysis of archaeological wood // *Journal of Archaeological Science*. 2015. Vol. 55. P. 188–196. doi: 10.1016/J.JAS.2014.12.015
- Tack P., Cotte M., Bauters S., Brun E., Banerjee D., Bras W., Ferrero C., Delattre D., Mocella V., Vincze L. Tracking ink composition on Herculaneum papyrus scrolls: Quantification and speciation of lead by X-ray based techniques and Monte Carlo simulations // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6 (1). P. 20763. doi: 10.1038/srep20763
- Tanner C., Rodgers G., Schulz G., Osterwalder M., Mani-Caplazi G., Hotz G., Scheel M., Weitkamp T., Müller B. Extended-field synchrotron microtomography for non-destructive analysis of incremental lines in archeological human teeth cementum // *Conference: Developments in X-Ray Tomography XIII*. 2021. Vol. 11840: 1184019. doi: 10.1117/12.2595180
- Tripp J.A., Squire M.E., Hedges R.E.M., Stevens R.E. Use of micro-computed tomography imaging and porosity measurements as indicators of collagen preservation in archaeological bone // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2018. № 511. P. 462–71. doi: 10.1016/j.palaeo.2018.09.012
- Tripp J.A., Squire M.E., Hamilton J., Hedges R.E.M. A non-destructive prescreening method for bone collagen content using micro-computed tomography // *Radiocarbon*. 2010. Vol. 52 (2). P. 612–619. doi: 10.1017/S0033822200045641
- Uda M., Demontier G., Nakai I. X-rays for Archaeology. Springer Dordrecht, 2005. doi: 10.1007/1-4020-3581-0
- Yang Y., Wang L., Wei S., Song G., Kenoyer J.M., Xiao T., Zhu J., Wang C. Nondestructive analysis of dragonfly eye beads from the warring states period, excavated from a Chu tomb at the Shenmingpu site, Henan Province, China // *Microscopy and Microanalysis*. 2013. Vol. 19 (2). P. 335–343. doi: 10.1017/S1431927612014201

References

- Andonova M. (2021) Ancient basketry on the inside: X-ray computed microtomography for the non-destructive assessment of small archaeological monocotyledonous fragments: examples from Southeast Europe, *Heritage Science*, Vol. 9:158. doi:10.1186/s40494-021-00631-z
- Baumann M., Plisson H., Maury S., Renou S., Coqueugniot H., Vanderesse N., Kolobova K., Shmaider S., Rots V., Gue'rin G., Rendu W. (2023) On the Quina side: A Neanderthal bone industry at Chez-Pinaud site, France, *PLoS ONE*, 18(6): e0284081. doi:10.1371/journal.pone.0284081
- Beck L., Cuif J.-P., Pichon L., Vaubailion S. Dambricourt Malassé A., Abel R.L. (2012) Checking collagen preservation in archaeological bone by non-destructive studies (Micro-CT and IBA), *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 273, pp. 203–207. doi:10.1016/j.nimb.2011.07.076
- Bill J., Daly A., Johnsen Ø., Dalen K.S. (2012) DendroCT – dendrochronology without damage, *Dendrochronologia*, Vol. 30, no. 3, pp. 223–230. doi: 10.1016/J.DENDRO.2011.11.002
- Bocharova E.N., Kozhevnikova D.V., Kolobova K.A. (2025) Metod komp'yuternoy mikrotomografii dlya izucheniya sostavnykh pazovykh orudiy [The use of microtomography for studying composite slotted tools], *Stratum Plus*, 1, pp. 285–300. doi:10.55086/sp251285300
- Bossemma F.G., Palenstijn W.J., Heginbotham A., Corona M., van Leeuwen T., van Liere R., Dorscheid J., O'Flynn D., Dyer J., Hermens E., Batenburg K.J. (2024) Enabling 3D CT-scanning of cultural heritage objects using only in-house 2D X-ray equipment in museums, *Nature Communications*, Vol. 15 (1): 3939. doi:10.1038/s41467-024-48102-w
- Bozzini B., Gianoncelli A., Mele C., Siciliano A., Mancini L. (2014) Electrochemical reconstruction of a heavily corroded Tarentum hemiobolus silver coin: a study based on microfocus X-ray computed microtomography, *Journal of Archaeological Science*, Vol. 52, pp. 24–30. doi:10.1016/j.jas.2014.08.002
- Bradfield J. (2013) Investigating the potential of micro-focus computed tomography in the study of ancient bone tool function: results from actualistic experiments, *Journal of Archaeological Science*, Vol. 40, no. 6, pp. 2606–2613. doi:10.1016/j.jas.2013.02.007
- Bradfield J. (2016) Fracture analysis of bone tools: a review of the micro-CT and macrofracture methods for studying bone tool function. In: *Close to the bone: current studies in bone technologies*, ed. Vitezovic S. Belgrade: Institute of Archaeology, pp. 71–79.
- Bradfield J., Hoffman J., De Beer F. (2016) Verifying the potential of micro-focus X-ray computed tomography in the study of ancient bone tool function, *Journal of Archaeological Science: Reports*, Vol. 5, pp. 80–84. doi:10.1016/j.jasrep.2015.11.001
- Cheng Q., Zhang X., Guo J., Wang B., Lei Y., Zhou G., Fu Y. (2019) Application of computed tomography in the analysis of glass beads unearthed in Shanpula cemetery (Khotan), Xinjiang Uyghur Autonomous Region, *Archaeological and Anthropological Science*, Vol. 11 (1), pp. 937–945. doi:10.1007/s12520-017-0582-6
- Cox S.L. (2015) A critical look at mummy CT scanning, *The Anatomical Record*, 298, pp. 1099–1110. doi:10.1002/ar.23149
- Elliott J.C., Dover S.D. (1982) X-ray microtomography, *Journal of Microscopy*, Vol. 126 (2), pp. 211–213. doi:10.1111/j.1365-2818.1982.tb00376.x
- Fedorov A., Beichel R., Kalpathy-Cramer J., Finet J., Fillion-Robin J.-C., Pujol S., Bauer C., Jennings D., Fennessy F. M., Sonka M., Buatti J., Aylward S. R., Miller J. V., Pieper S., Kikinis R. (2012) 3D Slicer as an image computing platform for the quantitative imaging network, *Magnetic Resonance Imaging*, Vol. 30 (9), pp. 1323–1341. doi: 10.1016/j.mri.2012.05.001
- Friml J., Procházková K., Melnyk G., Zikmund T., Kaiser J. (2014) Investigation of Cheb relief intarsia and the study of the technological process of its production by micro computed

- tomography, *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 15 (6), pp. 609–613. doi:10.1016/j.culher.2013.12.006
- Göldner D., Karakostis F.A., Falcucci A. (2022) Practical and technical aspects for the 3D scanning of lithic artefacts using micro-computed tomography techniques and laser light scanners for subsequent geometric morphometric analysis. Introducing the StyroStone protocol, *PLoS ONE*, 17(4): e0267163. doi:10.1371/journal.pone.0267163
- Grushin S.P., Sosnovsky I.A. (2018) Fotogrammetriya v arkhologii – metodika i perspektivy [Photogrammetry in archaeology – possibilities and methods], *Teoriya i praktika arkhologicheskikh issledovaniy*, Vol. 21, no. 1, pp. 99–105. doi: 10.14258/tpai(2018)1(21)-08
- Guryeva P.V., Zhuravlev D.V., Kovalenko E.S., Tereshchenko E.Yu., Yatsishina E.B. (2023) Figurnyy sosud v vide pantery iz Pantikapeya – vzglyad vovnutr' [Figure vessel in the form of a panther from Pantikapaion — view inside Archaeological News], *Arkheologicheskiye vesti*, no. 41, pp. 180–188. doi:10.31600/1817-6976-2023-41-180-188
- Iacconi C., Autret A., Desplanches E., Chave A., King A., Fayard B., Moulherat C., Leccia É., Bertrand L. (2023) Virtual technical analysis of archaeological textiles by synchrotron microtomography, *Journal of Archaeological Science*, Vol. 149: 105686. doi:10.1016/j.jas.2022.105686
- Jansen R.J., Poulsen M., Kottman J., de Groot T., Huisman D.J., Stoker J. (2006) CT: A new nondestructive method for visualizing and characterizing ancient Roman glass fragments in situ in blocks of soil, *Radiographics*, Vol. 26, no. 6, pp. 1837–1844. doi:10.1148/rg.266065079
- Kahl W.-A., Ramminger B. (2012) Non-destructive fabric analysis of prehistoric pottery using high-resolution X-ray microtomography: a pilot study on the late Mesolithic to Neolithic site Hamburg-Boberg, *Journal of Archaeological Science*, 39(7), pp. 2206–2219. doi:10.1016/j.jas.2012.02.029
- Karjalainen V.-P., Finnilä M.A.J., Salmon P.L., Lipkin S. (2023) Micro-computed tomography imaging and segmentation of the archaeological textiles from Valmarinniemi, *Journal of Archaeological Science*, Vol. 160:105871. doi:10.1016/j.jas.2023.105871
- Kimball J. J. L., With R., Rødsrud, C. L. (2024) A new and 'riveting' method: Micro-CT scanning for the documentation, conservation, and reconstruction of the Gjellestad Ship, *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 66 (378), pp. 76–85. doi:10.1016/j.culher.2023.11.003
- Kolobova K., Kharevich V., Chistyakov P., Kolyasnikova A., Kharevich A., Markin S., Krivoshepin A., Baumann M., Olsen J.W. (2022) How Neanderthals gripped retouchers: experimental reconstruction of the manipulation of bone retouchers by Neanderthal stone knappers, *Archaeological and Anthropological Sciences*, Vol. 14, pp. 1–10. doi:10.1007/s12520-021-01495-x
- Kolobova K., Rendu W., Shalagina A., Chistyakov P., Kovalev V., Baumann M., Kolyasnikova A., Krivoshepin A. (2020) The application of geometric-morphometric shape analysis to Middle Paleolithic bone retouchers from the Altai Mountains, Russia, *Quaternary International*, Vol. 559 (7), pp. 89–96. doi:10.1016/j.quaint.2020.06.018
- Kolobova K.A., Fedorchenko A.Y., Basova N.V., Postnov A.V., Kovalev V.S., Chistyakov P.V., Molodin V.I. (2019) The use of 3D-modeling for reconstructing the appearance and function of non-utilitarian items (the case of anthropomorphic figurines from Tourist-2), *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*, 4 (47), pp. 66–76. doi:10.17746/1563-0110.2019.47.4.066-076
- Kovalchuk M.V., Yatsishina E.B., Makarov N.A., Greshnikova E.A., Antsiferova A.A., Gunchinad O.L., Kashkarova P.K., Kovalenko E.S., Murasheva M.M., Olkhovskiy S.V., Poduretsa K.M., Timerkaev V.B. (2020) Tomograficheskiye issledovaniya terrakotovoy golovy iz Kerchenskoy bukhty [Tomographic studies of the terracotta head from Kerch Bay], *Kristallografiya*, Vol. 65, no. 5, pp. 832–838. doi:10.31857/S0023476120050124
- Kozhevnikova D.V., Chistyakov P.V., Kolobova K.A., Zotkina L.V. (2025) From neolithic to contemporary times: persistent use patterns of needle cases in Northeast Asia,

- Archaeological and Anthropological Sciences*, Vol. 17, no. 197. doi: 10.1007/s12520-025-02304-5
- Li Z., Doyon L., Fang H., Ledevin R., Queffelec A., Raguin E., d'Errico F. (2020) A Paleolithic bird figurine from the Lingjing site, Henan, China, *PLoS ONE*, 15 (6): e0233370. doi:10.1371/journal.pone.0233370
- Liao L., Cheng Q., Zhang X., Qu L., Liu S., Ma S., Chen K., Liu Y., Wang Y., Song W. (2024) Segmentation and visualization of the Shampula dragonfly eye glass bead CT images using a deep learning method, *Heritage Science*, Vol. 12: 381. doi:10.1186/s40494-024-01505-w
- Licata M., Borgo M., Armocida G., Nicosia L., Ferioli E. (2016) New paleoradiological investigations of ancient human remains from North West Lombardy archaeological excavations, *Skeletal Radiology*, 45, pp. 323–331. doi:10.1007/s00256-015-2266-6
- Lipkin S., Karjalainen V.-P., Puolakka H.-L., Finnilä, M.A.J. (2023) Advantages and limitations of micro-computed tomography and computed tomography imaging of archaeological textiles and coffins, *Heritage Science*, Vol. 11, pp. 1–15. doi:10.1186/s40494-023-01076-2
- Loman V.G. (2020) Rentgenovskaya komp'yuternaya tomografiya v izuchenii drevnikh keramicheskikh sosudov [X-ray computer tomography in the studies of ceramic vessels], *Kratkiye Soobshcheniya Instituta Arkheologii*, 259, pp. 425–435. doi:10.25681/IARAS.0130-2620.259.425-434
- McKenzie-Clark J., Magnussen J. (2014) Dual energy computed tomography for the non-destructive analysis of ancient ceramics, *Archaeometry*, 56(4), pp. 573–590. doi:10.1111/arc.12035
- McKnight L.M., Bibb R., Cooper F. (2024) Seeing is believing – The application of Three-Dimensional modelling technologies to reconstruct the final hours in the life of an ancient Egyptian Crocodile, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 34: e00356. doi:10.1016/j.daach.2024.e00356
- McPherron S.P., Gernat T., Hublin J.J. (2009) Structured light scanning for high-resolution documentation of in situ archaeological finds, *Journal of Archaeological Science*, Vol. 36 (1), pp. 19–24. doi:10.1016/j.jas.2008.06.028
- Miles J., Mavrogordato M., Sinclair I., Hinton D., Boardman R., Earl G. (2016) The use of computed tomography for the study of archaeological coins, *Journal of Archaeological Science Reports*, Vol. 6, pp. 35–41. doi:10.1016/j.jasrep.2016.01.019
- Mocella V., Brun E., Ferrero C., Delattre D. (2015) Revealing letters in rolled Herculaneum papyri by X-ray phase-contrast imaging, *Nature Communications*, Vol. 6, no. 1: 5895. doi: 10.1038/NCOMMS6895
- Müller B., Stiefel M., Rodgers G., Humbel M., Osterwalder M., Jackowski J. von Hotz G., Velasco Guadarrama A.A., Bunn H.T., Scheel M., Weitekamp T., Schulz G., Tanner C. (2022) Three-Dimensional Imaging and Analysis of Annual Layers in Tree Trunk and Tooth Cementum, *Conference: Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication XII*, Vol. 12041:120410C. doi: 10.1117/12.2615148
- Murphy W.A., zur Nedden D., Gostner P., Knapp R., Recheis W., Seidler H. (2003) The Iceman: discovery and imaging, *Radiology*, no. 226, pp. 614–629. doi:10.1148/radiol.2263020338
- Nykonenko D., Yatsuk O., Guidorzi L., Lo Giudice A., Tansella F., Cesareo L.P., Sorrentino G., Davit P., Gulmini M., Re A. (2023) Glass beads from a Scythian grave on the island of Khortytsia (Zaporizhzhia, Ukraine): insights into bead making through 3D imaging, *Heritage Science*, Vol. 11:238. doi:10.1186/s40494-023-01078-0
- Orłowska J., Cyrek K., Kaczmarczyk G.P., Migal W., Osipowicz G. (2023) Rediscovery of the Palaeolithic antler hammer from Biskup Cave, Poland: New insights into its chronology, raw material, technology of production and function, *Quaternary International*, 665–666 (1), pp. 48–64. doi:10.1016/j.quaint.2022.08.011

- Pargeter J., Bam L., de Beer F., Lombard M. (2017) Microfocus X-ray tomography as a method for characterising macro-fractures on quartz backed tools, *The South African Archaeological Bulletin*, Vol. 72, no. 206, pp. 148–155.
- Parsons S., Parker C.S., Chapman C., Seales W.B. (2023) EduceLab-scrolls: Verifiable recovery of text from Herculaneum papyri using X-ray CT, *arXiv preprint*. doi: 10.48550/arXiv.2304.02084
- Re A., Corsi J., Demmelbauer M., Martini M., Mila G., Ricci C. (2015) X-ray tomography of a soil block: a useful tool for the restoration of archaeological finds, *Heritage Science*, Vol. 3 (4), pp. 1–7. doi:10.1186/s40494-015-0033-6
- Rolfe S., Pieper S., Porto A., Diamond K., Winchester J., Shan S., Kirveslahti H., Boyer D., Summers A., Maga A. M. (2021) SlicerMorph: an open and extensible platform to retrieve, visualize and analyze 3D morphology, *Methods in Ecology and Evolution*, Vol. 12(7), pp. 1816–1825. doi: 10.1111/2041-210X.13669
- Sallam A., Hemed A., Toprak M., Muhammed M., Hassan M., Uheida A. (2019) CT scanning and MATLAB calculations for preservation of coptic mural paintings in historic Egyptian monasteries, *Scientific Reports*, Vol. 9 (1): 3903. doi:10.1038/s41598-019-40297-z
- Serrano A., Meijer S., van Rijn R.R., Coban S.B., Reissland B., Hermens E., Batenburg K.J., van Bommel M. (2021) A non-invasive imaging approach for improved assessments on the construction and the condition of historical knotted-pile carpets, *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 47, pp. 79–88. doi:10.1016/j.culher.2020.09.012
- Shalagina A.V., Kolobova K.A., Chistiakov P.V., Krivoschapkin A.I. (2020) Primenenie trekhmernogo geometriko-morfometricheskogo analiza dlia izucheniia artefaktov kamennogo veka [Application of 3D geometric morphometric analysis in the study of Stone Age lithic artifacts], *Stratum plus*, 1. pp. 343–358.
- Shishlina N.I., Orfinskaya O.V., Leonova N.V., Loboda A.Yu., Kovalenko E.S., Guryeva P.V., Kondratev O.A., Kozhukhova E.I., Mandrykina A.V., Tereschenko E.Yu., Yatsishina E.B. (2024) Novyye podkhody k analizu srednevekovogo tekstilya metodami istoricheskogo materialovedeniya [New approaches to the analysis of medieval textile. Using historical material science methods], *Kratkiye Soobshcheniya Instituta Arkheologii*, 276, pp. 312–327. doi:10.25681/IA5A6.0130-2620.276.312-327
- Smeriglio A., Filosa R., Crocco M.C., Vincenzo C., Formoso V., Cristoforo R., Solano B.A., Cerzoso M., Polosa A., Cerrone V., Agostino R.G. (2023) A numismatic study of Roman coins through X-ray fluorescence and X-ray computed μ -tomography analysis, *Acta IMEKO*, Vol. 12, no. 4, pp. 1–7. doi:10.21014/actaimeko.v12i4.1504
- Stelzner J., Gauß F., Schuetz P. (2016) X-ray computed tomography for non-destructive analysis of early Medieval swords, *Studies in Conservation*, 61(2), pp. 86–101. doi:10.1179/2047058414Y.0000000157
- Stelzner J., Million S. (2015) X-ray computed tomography for the anatomical and dendrochronological analysis of archaeological wood, *Journal of Archaeological Science*, Vol. 55, pp. 188–196. doi: 10.1016/J.JAS.2014.12.015
- Tack P., Cotte M., Bauters S., Brun E., Banerjee D., Bras W., Ferrero C., Delattre D., Mocella V., Vincze L. (2016) Tracking ink composition on Herculaneum papyrus scrolls: Quantification and speciation of lead by X-ray based techniques and Monte Carlo simulations, *Scientific Reports*, Vol. 6 (1), pp. 20763. doi:10.1038/srep20763
- Tanner C., Rodgers G., Schulz G., Osterwalder M., Mani-Caplazi G., Hotz G., Scheel M., Weitkamp T., Müller B. (2021) Extended-field synchrotron microtomography for non-destructive analysis of incremental lines in archeological human teeth cementum, *Conference: Developments in X-Ray Tomography XIII*, Vol. 11840: 1184019. doi: 10.1117/12.2595180
- Tripp J.A., Squire M.E., Hedges R.E.M., Stevens R.E. (2018) Use of micro-computed tomography imaging and porosity measurements as indicators of collagen preservation in archaeological bone, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 511, pp. 462–71. doi:10.1016/j.palaeo.2018.09.012

- Tripp J.A., Squire M.E., Hamilton J., Hedges R.E.M. (2010) A non-destructive prescreening method for bone collagen content using micro-computed tomography, *Radiocarbon*, Vol. 52 (2), pp. 612–619. doi:10.1017/S0033822200045641
- Uda M., Demontier G., Nakai I. (2005) *X-rays for Archaeology*. Springer Dordrecht. doi:10.1007/1-4020-3581-0
- Yang Y., Wang L., Wei S., Song G., Kenoyer J.M., Xiao T., Zhu J., Wang C. (2013) Nondestructive analysis of dragonfly eye beads from the warring states period, excavated from a Chu tomb at the Shenmingpu site, Henan Province, China, *Microscopy and Microanalysis*, Vol. 19 (2), pp. 335–343. doi:10.1017/S1431927612014201
- Zaytseva I.E., Kovalenko E.S., Guryeva P.V., Mandrykina A.V., Kondratyev O.A., Ismagulov A.M., Podurets K.M., Tereschenko E.Yu., Yatsishina E.B. (2023) Tri braseleta iz Isadskogo klada 2021 g.: tekhnologiya izgotovleniya i sostav metalla [Three bracelets from the Isady hoard of 2021: production technology and metal composition], *Kratiye Soobshcheniya Instituta Arkheologii*, 272, pp. 356–376. doi:10.25681/IA5A6.0130-2620.272.356-376
- Zhuravlev D.V., Guryeva P.V., Kovalenko E.S., Tereschenko E.Yu., Yatsishina E.B. (2024) Kiprskiy figurnyye sosudy epokhi bronzы iz sobraniya Gosudarstvennogo istoricheskogo muzeya: vzglyad vnur' [Figured Vessels from Bronze-Age Cyprus in the collection of the State Historical Museum: a look inside], *Vestnik drevney istorii*, Vol. 84, no. 2, pp. 275–299. doi:10.31857/S0321039124020027

Сведения об авторах:

БОЧАРОВА Екатерина Николаевна – младший научный сотрудник, Институт археологии и этнографии СО РАН (Новосибирск, Россия). E-mail: bocharova.e@gmail.com

КОЖЕВНИКОВА Дарья Валерьевна – кандидат исторических наук, научный сотрудник, Институт археологии и этнографии СО РАН (Новосибирск, Россия). E-mail: kozhevnikovadarya@yandex.ru

КОЛОБОВА Ксения Анатольевна – доктор исторических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией «ЦифРА», Институт археологии и этнографии СО РАН (Новосибирск, Россия). E-mail: kolobovak@yandex.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Ekaterina N. Bocharova, Institute of Archaeology and Ethnography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: bocharova.e@gmail.com

Darya V. Kozhevnikova, Institute of Archaeology and Ethnography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: kozhevnikovadarya@yandex.ru

Ksenya A. Kolobova, Institute of Archaeology and Ethnography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: kolobovak@yandex.ru

The authors declare no conflict of interests.

*Статья поступила в редакцию 13 апреля 2025;
принята к публикации 2 июня 2025.*

*The article was submitted 13.04.2025;
accepted for publication 02.06.2025.*