

Е. Н. Бочарова✉, Д. В. Кожевникова, Г. Д. Павленок, К. А. Колобова

Институт археологии и этнографии СО РАН

Новосибирск, Россия

E-mail: bocharova.e@gmail.com

Аналитический потенциал сегментации КТ-данных в археологии на примере фрагментов керамических сосудов

Настоящее исследование посвящено демонстрации аналитического потенциала сегментации данных компьютерной микротомографии (микро-КТ) при исследовании археологической керамики. Цель работы заключается в оценке возможностей сегментации для изучения внутренней структуры керамических сосудов, в т.ч. минеральные включения, пустоты и следы выгоревшей органики. Исследование основано на анализе трех керамических фрагментов различных хронологических периодов из южной галереи Денисовой пещеры, полученных с использованием системы микро-КТ «ПРОДИС.Компакт». Обработка данных проводилась в программных средах 3D Slicer и «ПРОДИС: Визуализатор» с применением псевдоцветового кодирования, ручных и полуавтоматических алгоритмов сегментации. В результате удалось визуализировать внутреннюю микроструктуру керамики, выявить особенности распределения включений, пор и пустот, а также получить трехмерные реконструкции отдельных структурных компонентов, включая вероятные следы органических примесей. Для орнаментированного фрагмента керамики афанасьевской культуры установлено неравномерное распределение угловатых минеральных включений и наличие вытянутых пор и трещин. Неорнаментированный фрагмент тулова сосуда раннего железного века характеризуется высокой концентрацией включений различного размера и вытянутых пустот, вероятно, связанных с выгоранием органических примесей. В донной части средневекового сосуда выявлена неоднородная микроструктура, признаки слоистости и вытянутые пустоты, для одной из которых была выполнена трехмерная реконструкция, предположительно отражающая остатки растительного материала. Результаты исследования показывают, что сегментация КТ-данных является эффективным самостоятельным исследовательским инструментом неразрушающего изучения керамики.

Ключевые слова: керамика, Денисова пещера, микрокомпьютерная томография (микро-КТ), сегментация, неразрушающий анализ.

E. N. Bocharova✉, D. V. Kozhevnikova, G. D. Pavlenok, K. A. Kolobova

Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS

Novosibirsk, Russia

E-mail: bocharova.e@gmail.com

Analytical Potential of CT Data Segmentation in Archaeology: A Case Study of Ceramic Vessel Fragments

The authors demonstrate the analytical potential of micro-computed tomography (micro-CT) data segmentation in the analyses of archaeological ceramics. The potential of segmentation in the analyses of the internal structure of ceramic vessels including mineral inclusions, voids, and traces of burnt organic matter was evaluated. The study is based on the analysis of three ceramic fragments from distinct chronological periods recovered in the South Chamber of Denisova Cave and scanned using the PRODIS Compact micro-CT system. Data processing was carried out in 3D Slicer and PRODIS: Visualizer software through pseudocolor coding and manual and semi-automatic segmentation algorithms. The internal microstructure of the ceramics was visualized, patterns in the distribution of inclusions, pores, and voids were identified, and three-dimensional reconstructions of individual structural components including possible traces of organic temper were derived. The patterned Afanasievo culture potsherd revealed an uneven distribution of angular mineral inclusions along with elongated pores and cracks. The fragment of a non-patterned vessel body from the Early Iron Age was characterized by a high concentration of inclusions of various sizes and elongated voids probably associated with the burning out of organic additives. The base fragment of the medieval vessel demonstrated a heterogeneous microstructure, traces of layering, and elongated voids; a 3- dimension reconstruction of one of the voids has been tentatively interpreted as the remains of plant material. The results show that CT-data segmentation represents an effective independent research tool for the non-destructive studies of archaeological ceramics. The study demonstrates the potential of CT-data segmentation as a non-destructive analytical tool for archaeological interpretation of ceramic production technology.

Keywords: ceramic, Denisova Cave, micro-computed tomography (micro-CT), segmentation, non-destructive analysis.

Введение

Рентгеновская компьютерная томография (КТ) и микро-КТ (μ СТ) являются инструментом неразрушающего анализа внутренней структуры артефактов [Бочарова, Кожевникова, Колобова, 2025a]. Однако сами по себе томографические данные представляют собой трехмерный массив вокселей, каждому из которых соответствует значение интенсивности, отражающее степень ослабления рентгеновского излучения, визуализируемое в виде оттенков серого. Интерпретация этих данных существенно ограничена без последующей обработки, ключевым этапом которой является сегментация: выделение отдельных структур, материалов или компонентов внутри исследуемого объекта. Она лежит в основе таких процедур, как виртуальное разворачивание свитков (напр.: [Mocella et al., 2015; Bukreeva et al., 2016; Tack et al., 2016; Stabile et al., 2021; Albertin, 2022]); изучении мумий и других антропологических останков (напр.: [Медникова, 2011; Murphy et al. 2003; Krivoshekin, Chikisheva, Zubova, 2014; Licata et al., 2016; Xi et al., 2024]), артефактов из различных материалов (напр.: [Abel et al., 2011; Bettuzzi et al., 2015; Baumann et al., 2023; Geijer, Ndongoz, Edvardsson, 2024]), инкрустаций (напр.: [Re et al., 2015; Stelzner, Gauß, Schuetz, 2016; Liao et al. 2024]), а также составных орудий, вложенных предметов и закрытых объектов (напр.: [Бочарова, Кожевникова, Колобова, 2025b; Jansen et al., 2006; Miles et al. 2016; Lipkin et al., 2023; Kozhevnikova et al., 2025]), обеспечивая высокую точность дальнейших реконструкций и интерпретаций. Современные исследования демонстрируют разнообразие подходов к сегментации – от ручных и полуавтоматических методов до использования алгоритмов машинного обучения. Несмотря на очевидный потенциал, применение сегментации в археологии остается методологически недостаточно разработанным. Основные проблемы связаны с высокой гетерогенностью археологических материалов, перекрытием плотностей различных компонентов, а также зависимостью результатов от выбранных алгоритмов и параметров обработки.

Настоящая работа направлена на демонстрацию аналитического потенциала сегментации КТ-данных на примере фрагментов керамических сосудов. Выбор керамики в качестве объекта исследования обусловлен ее специфическими физико-структурными свойствами, делающими данный материал особенно информативным для использования КТ. Керамика представляет собой разнородную структуру, включающую глину, минеральные и органические включения, контраст между которыми обеспечивает эффективную сегментацию КТ-данных (напр.: [Kahl, Ramming, 2012; McKenzie-Clark, Magnussen, 2014; Kulkova, Kulkov, 2016; Reedy, Reedy, 2022; Caloi, Bernardini, 2024; Kozatsas et al., 2025]). В отличие от более однородных археологических материалов, керамика, состоящая из

нескольких составляющих, является удобной моделью для тестирования методов сегментации и дальнейшей интерпретации полученных данных. В статье рассматриваются керамические фрагменты, где сегментация используется для выделения примесей в тесте глины, а также пустот, потенциально интерпретируемых как следы выгоревшей органики.

Материалы и методы

В качестве исходных данных использованы КТ-сканы фрагментов керамики из голоценовой толщи в южной галерее Денисовой пещеры, раскопки 1999 и 2017 гг. [Деревянко и др., 1999; Шуньков и др., 2017]. Выборка образцов осуществлялась исходя из возможности КТ для различных частей сосуда, орнаментированные и неорнаментированные; она состоит из трех фрагментов керамики:

- фрагмент тулова сосуда афанасьевской культуры раннего бронзового века, украшенного рядами горизонтальной «елочки» и «шагающей гребенки» (рис. 1, 1);

- неорнаментированный фрагмент тулова сосуда из отложений с находками раннего железного века (рис. 2, 1);

- фрагмент донной части толстостенного неорнаментированного сосуда, датированного эпохой Средневековья (рис. 3, 1a). Сохранившаяся стенка сосуда несет следы заглаживания.

Данные получены с использованием микро-КТ системы ПРОДИС.Компакт. Обработка данных осуществлялась с использованием специализированного программного обеспечения ПРОДИС и Slicer 3D (версия 5.6.2; [Fedorov et al., 2012]).

Сегментация томографических данных керамических фрагментов выполнялась двумя способами: в программной среде 3D Slicer, также с использованием специализированного программного обеспечения ПРОДИС: Визуализатор. Исходные КТ-данные были предварительно реконструированы. На первом этапе осуществлялась загрузка КТ-данных с последующей проверкой корректности пространственного разрешения и ориентации данных. Применялась операция обрезки объема для ограничения области анализа, а также фильтрация с целью снижения уровня шума и повышения качества сегментации.

Сегментация в ПО Slicer3D проводилась в модуле Segment Editor. Для объекта формировался набор сегментов, отражающих его структурные компоненты (глина, примеси, поры/пустоты). Первичный этап сегментации основывался на пороговой классификации (Thresholding), позволяющей выделить области с различной рентгеновской плотностью. Диапазоны интенсивностей подбирались с учетом особенностей материалов. Данный этап обеспечивал получение предварительных масок, однако вследствие неоднородности плотности объектов требовал последующей

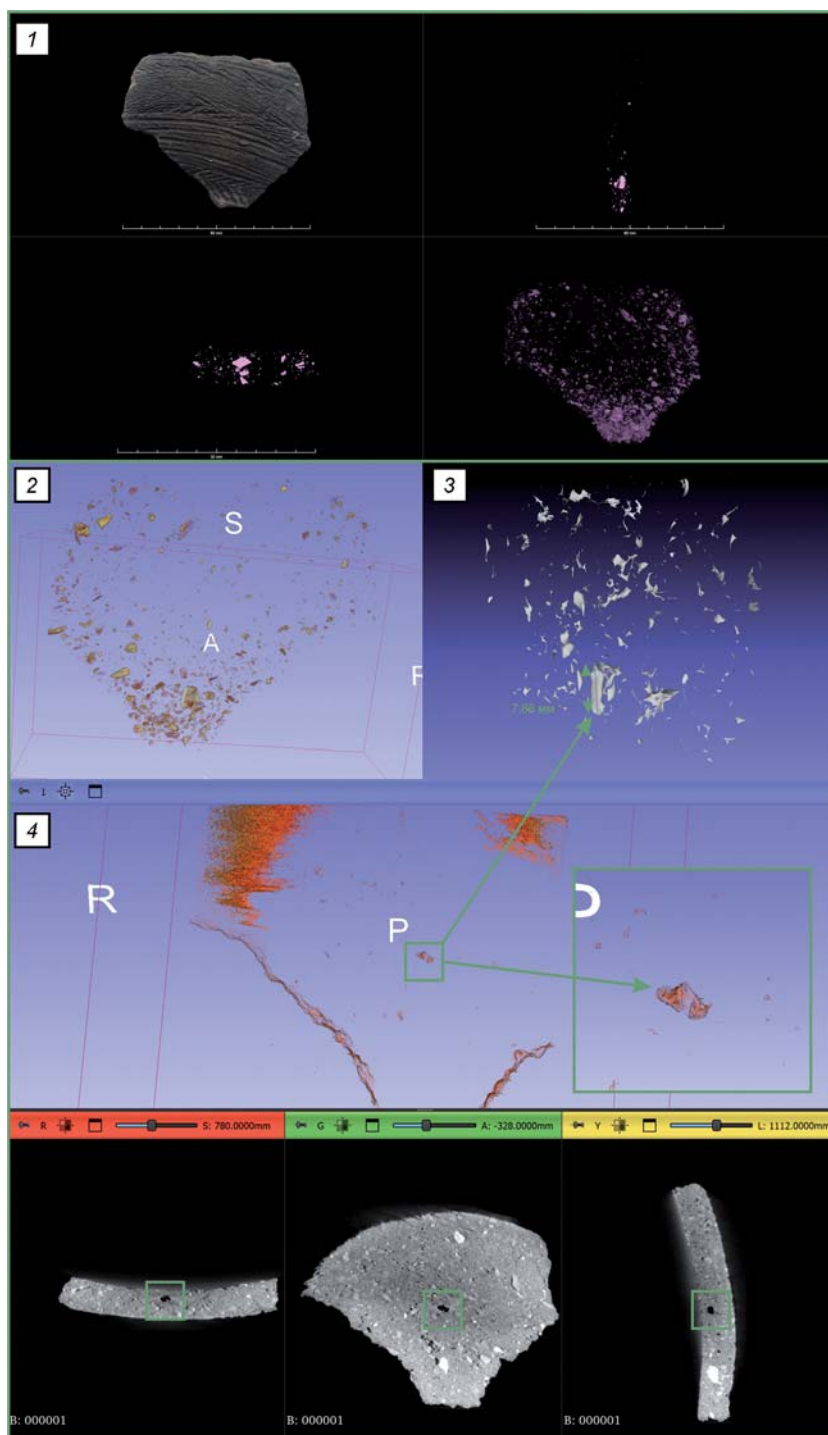


Рис.1. Микро-КТ орнаментированного фрагмента керамики.

1 – фотография проекции фрагмента в программе ПРОДИС: Визуализатор; 2 – сегментация минеральных включений, программа Slicer 3D; 3 – визуализация пустот, экспортированная 3D-модель; 4 – сегментация и визуализация пустот программа Slicer 3D.

доработки. Уточнение сегментации осуществлялось с применением ручных и полуавтоматических инструментов. Использовались инструменты «Рисование» и «Стирание» для послойной корректировки масок, «Ножницы» для отсечения избыточных областей, а также «Острова» для выделения и удаления несвязанных компонент. Дополнительно применялся

алгоритм Grow from Seeds («выращивание из семян»), обеспечивающий полуавтоматическое разделение материалов на основе заданных пользователем «семян», что было наиболее эффективно при сегментации минеральных включений. Дополнительно применялись морфологические операции, включая Сглаживание, а также операции, направленные на устранение ар-

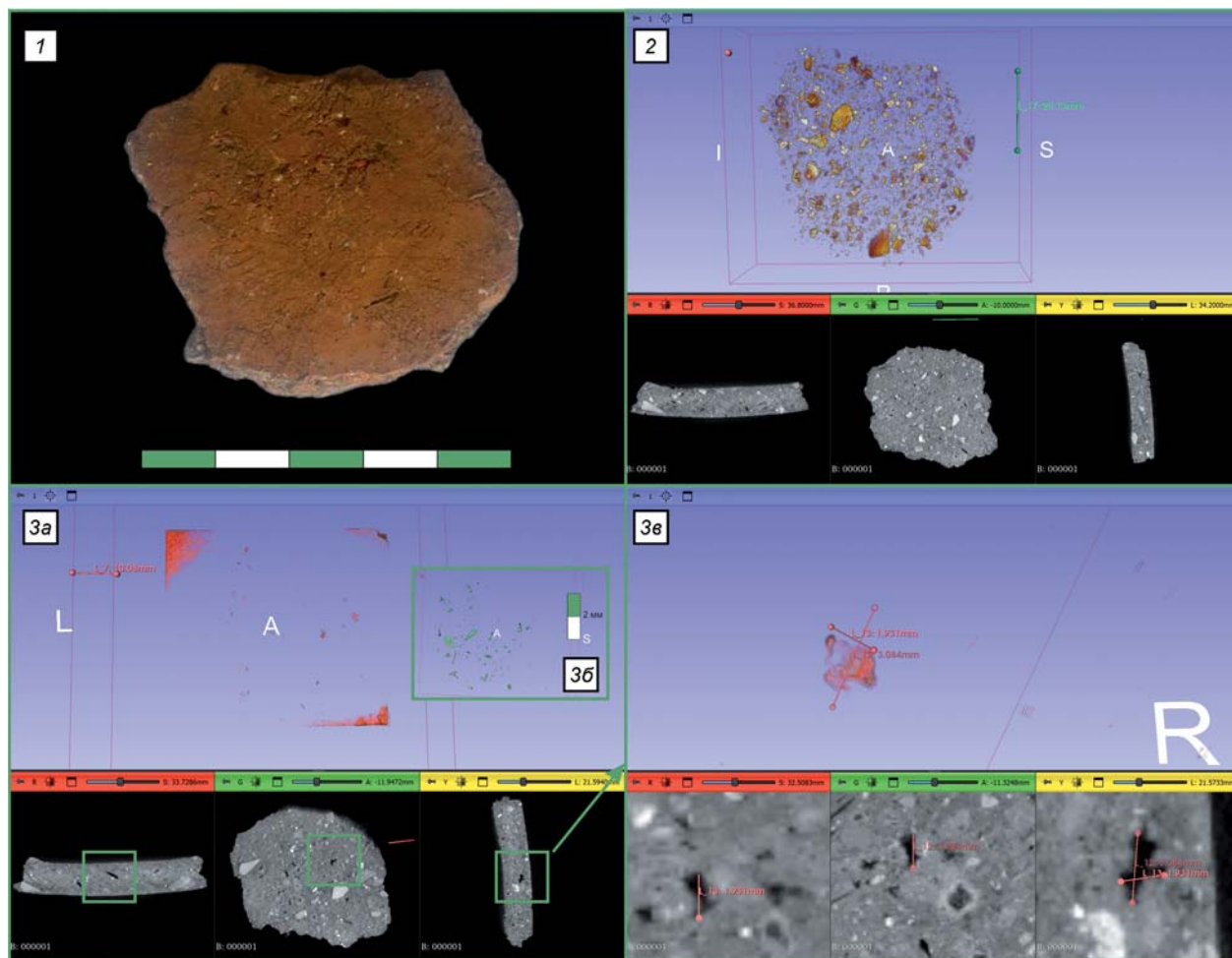


Рис. 2. Микро-КТ неорнаментированного фрагмента керамики.

1 – фотография фрагмента; 2а – визуализация минеральных включений, программа Slicer 3D; 2б – сегментация минеральных включений, программа Slicer 3D; 3а – визуализация пустот, программа Slicer 3D; 3б – визуализация пустот, экспортированная 3D-модель; 3в – визуализация пустот, программа Slicer 3D.

тефактов сегментации, заполнение мелких полостей и удаление шумовых элементов.

Контроль качества сегментации проводился путем сопоставления полученных масок с исходными томографическими срезами в трех ортогональных проекциях, а также посредством трехмерной визуализации сегментов: проверка точности выделения границ и структурных элементов объектов.

Финальные сегменты экспортировались в виде трехмерных моделей (форматы STL/OBJ) для последующего анализа.

Специализированное программное обеспечение ПРОДИС: Визуализатор предназначено для визуализации и анализа рентгенографических изображений микроКТ и является частью системы ПРОДИС.Компакт. Следует отметить, что реализуемый в ПРОДИС подход к виртуальному извлечению компонентов не представляет собой сегментацию в строгом смысле. Программа осуществляет дифференциацию материалов на основе различий в рентгеновской плотности с последующей визуализацией в виде цветового коди-

рования. Однако при этом не формируются отдельные сегменты (объемные маски), пригодные для дальнейшего морфометрического анализа. Функциональные возможности ПРОДИС ограничены визуализацией и экспортом растровых изображений, что не позволяет получать отдельные трехмерные модели компонентов исследуемого объекта.

На этапе предварительной обработки применялись инструменты фильтрации и обработки, направленные на снижение уровня шума и повышение контрастности между компонентами, обладающими различной рентгеновской плотностью. Полученные изображения загружались в ПРОДИС: Визуализатор. Ключевым этапом являлась визуальная дифференциация структур на основе различий в интенсивности сигнала. С использованием функции псевдоцветового кодирования различным диапазонам плотностей присваивались различные цветовые значения. Это позволяло выделять и визуально различать основные «компоненты» керамического теста, включая глину, минеральные включения и пористость (воздух). Дополнительно

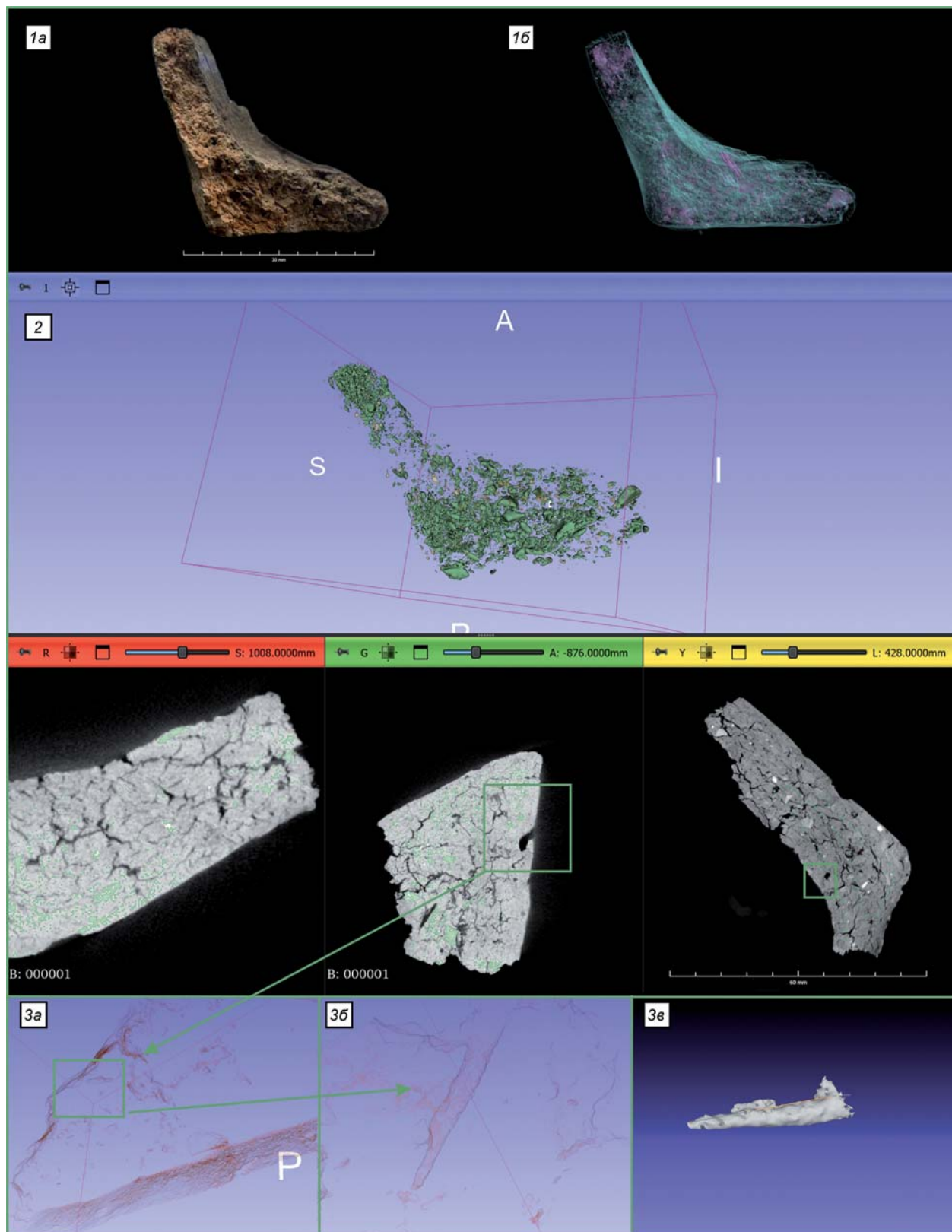


Рис. 3. Микро-КТ фрагмента донной части.

1а – фотография фрагмента; 1б – визуализация внутренней структуры, программа ПРОДИС: Визуализатор; 2 – сегментация минеральных включений, программа Slicer 3D; 3а, 3б – визуализация пустот, программа Slicer 3D; 3в – визуализация пустот, экспортированная 3D-модель.

выполнялась корректировка полученных изображений, включающая регулировку параметров визуализации (яркость, контраст, прозрачность). Полученные данные использовались для качественного анализа внутренней структуры керамических образцов и визуальной оценки распределения включений.

Результаты

На основе полученных данных снимков микро-КТ фрагментов керамики проводилась оценка характеристик включений (размер, форма, объемная доля, пространственное распределение), что позволяло использовать результаты сегментации для интерпретации технологии изготовления керамики и состава формовочной массы. Проведенное исследование направлено прежде всего на демонстрацию возможностей метода, тогда как детальный анализ керамических фрагментов выходит за рамки поставленных задач данной статьи.

По данным микро-КТ орнаментированного фрагмента тулова сосуда фиксируется, что включения распределены неравномерно: их больше по краям и меньше в центральной части (см. рис. 1, 1–2). Включения представлены частицами различного размера и преимущественно угловатой формы. Их неравномерное распределение и наличие локальных скоплений может свидетельствовать о неравномерном перемешивании формовочной массы. Поровое пространство представлено вытянутыми трещинами, пустотами вокруг включений и отдельными порами (см. рис. 1, 3–4).

Внутренняя структура второго образца (неорнаментированный фрагмент тулова) характеризуется наличием значительного количества твердых включений, четко выделяющихся за счет повышенной рентгеновской плотности (см. рис. 2, 2). В трехмерной визуализации они представлены в виде угловатых частиц неправильной формы, слабо окатанные. Размер включений варьирует от ~ 0,2 до 3–5 мм, при преобладании фракции 0,5–1,5 мм. Крупные зерна встречаются единично, тогда как основная масса представлена мелкой и средней фракцией. Границы включений резкие. Пространственное распределение включений в целом равномерное, однако локально наблюдаются зоны их сгущения. Поровая структура хорошо фиксируется на КТ-срезах в виде участков пониженной плотности (см. рис. 2, 3а, 3в). Выделяются две основные группы (см. рис. 2, 3а). Первая представлена пустотами, расположенными между минеральными включениями и тестом. Они имеют неправильную форму и небольшие размеры (менее 0,5 мм). Вторая группа – вытянутые поры, достигающие 1,9–3,0 мм в длину (см. рис. 2, 3в). В трехмерной сегментации включения представлены изолированными объектами неправильной, преимущественно вытянутой формы (рис. 3, 3б). Их распределение в объеме неравномерное, с локальной концентрацией в центральной части образца. Включения не образуют связной структуры.

Интерпретация данных включений как следов выгоревшей органики является вероятной, однако требует дополнительной верификации.

КТ-анализ донной части сосуда выявил неоднородную микроструктуру с чередованием участков различной плотности (рис. 3, 1б). В ряде срезов прослеживается слабовыраженная слоистость, ориентированная субпараллельно поверхности, что может указывать на поэтапное наращивание массы в зоне дна (рис. 3, 2). Включения представлены примесью двух видов (рис. 3, 2): включения угловатой формы с широким гранулометрическим диапазоном и обладающие повышенной рентгеновской плотностью, а также фрагменты в основном округлой, окатанной формы небольшого размера. Их распределение неравномерное. Распределение пор неравномерное, с тенденцией к увеличению их концентрации в центральных зонах. Выделяется система пор различной морфологии: преобладают мелкие и средние поры, наряду с которыми встречаются вытянутые пустоты, интерпретируемые как следы выгорания органического материала (рис. 3, 2–3а). Сегментация позволила получить 3D-модель заполнения пустоты (рис. 3, 3б, 3в): круглое в сечении продолговатое включение с небольшим разветвлением на одном из краев. Можно предположить, что это фрагмент сгоревшей ветки или травы. Размер включения не превышает 8 мм в длину и 1 мм в диаметре.

Заключение

Основными преимуществами КТ является возможность не только фиксировать наличие пустот, но и проводить их морфологический и количественный анализ (объем, форма, распределение), а также реконструировать исходную форму таких включений. Микро-КТ исследуемых фрагментов позволяет реконструировать форму, предположительно, растительных включений в фрагменте донны сосуда и неорнаментированного фрагмента тулова. В описанных случаях, к сожалению, нет возможности определить тип растения, однако в литературе известны примеры, когда подобные определения были выполнены. Например, при анализе керамики с неолитической стоянки Ракушечный Яр (Ростовская область) трехмерная реконструкция пустот позволила определить тип растительных включений: многолетнее растение *Stuckenia pectinata* (синоним *Potamogeton pectinatus*), характерное для мелководных пойменных участков нижнего Дона. Этот вид широко распространен в аллювиальных глинистых отложениях и использовался древними гончарами при изготовлении сосудов [Kulkova, Kulkov, 2016]. Несколько видов растительных включений удалось реконструировать при изучении микроструктуры керамических фрагментов со стоянки конца мезолита-неолита Гамбург-Боберг 15 (северная Германия) [Kahl, Ramming, 2012]. Первые прямые доказательства использования проса (идентификация зерен и шелухи

проса (*Panicum miliaceum*) в керамике) в Северо-Западном Крыму в позднем бронзовом веке также были получены при помощи анализа КТ-снимков [Кульков, Кулькова, Кашуба, 2025]. Помимо растительных включений известны случаи сегментирования фрагментов шерсти и перьев [Kulkova, Kulkov, 2015].

Метод также позволяет оценивать особенности технологии изготовления – состав керамической массы, характер распределения примесей и условия обжига (напр., [Kahl, Ramminger, 2012; Kozatsas et al., 2025; Caloi, Bernardini et al., 2024; Ломан 2020]). Главным преимуществом является то, что микро-КТ применяется в исследовании керамики как неразрушающий метод, позволяющий изучать состав теста, включения, трещины способы формовки без необходимости разрушать объект. Сегментация КТ-данных является не только техническим этапом обработки изображений, но и самостоятельным аналитическим инструментом, способным существенно расширить возможности археологической интерпретации.

Финансирование

Исследование проведено в рамках проекта НИР ИАЭТ СО РАН № FWZG-2025-0007 «Применение цифровых технологий при анализе археологических источников и реконструкции истории древнейших сообществ».

Благодарности

Авторы признательны М. В. Шунькову и М. Б. Козликину, предоставившим образцы керамики из Денисовой пещеры и сопроводительную информацию об этих находках. При микро-КТ было использовано оборудование Центра коллективного пользования «Геохронология кайнозоя» ИАЭТ СО РАН (г. Новосибирск) (система ПРОДИС.Компакт).

Список литературы

- Бочарова Е. Н., Кожевникова Д. В., Колобова К. А.** Метод компьютерной микротомографии для изучения составных пазовых орудий // *Stratum plus*. – 2025a. – № 1. – С. 285–300. – doi:10.55086/sp251285300
- Бочарова Е. Н., Кожевникова Д. В., Колобова К. А.** Возможности и перспективы применения КТ и микро-КТ в археологических исследованиях // *Сибирские исторические исследования*. – 2025b. – № 3. – С. 152–173. – doi:10.17223/2312461X/49/8
- Деревянко А. П., Молодин В. И., Шуньков М. В., Аношкин А. А.** Археологическое изучение голоценовых слоев Денисовой пещеры // *Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий*: – Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 1999. – Т. V. – С. 348–353.
- Кульков А. М., Кулькова М. А., Кашуба М. Т.** Растительные остатки в керамике позднего бронзового – раннего железного веков Северного Причерноморья по данным компьютерной микротомографии (М-СТ) // *Проблемы археологии и этноистории Восточной Европы, Сибири и Северо-Восточной Азии*. – Уфа: Евразийский музей кочевых цивилизаций, 2025. – С. 79–82.

Ломан В. Г. Рентгеновская компьютерная томография в изучении древних керамических сосудов // *КСИА*. – 2020. – Вып. 259. – С. 425–435.

Медникова М. Б. Посткраниальная морфология и таксономия представителей рода *Homo* из пещеры Окладникова на Алтае. – Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2011. – 128 с.

Шуньков М. В., Козликин М. Б., Ульянов В. А., Федорченко А. Ю., Чеха А. Н., Бочарова Е. Н. Новые результаты исследования голоценовых отложений в южной галерее Денисовой пещеры // *Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий*. – Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2017. – Т. XXIII. – С. 457–458.

Abel R. L., Parfitt S., Ashton N., Lewis S. G., Scott B., Stringer C. Digital preservation and dissemination of ancient lithic technology with modern micro-CT // *Computers & Graphics*. – 2011. – Vol. 35 (4). – P. 878–884. – doi:10.1016/j.cag.2011.03.001

Albertin F. X-ray tomography for manuscripts // *Umanistica Digitale*. – 2022. – N 12. – P. 39–64.

Baumann M., Plisson H., Maury S., Renou S., Coqueugniot H., Vanderesse N., Kolobova K., Shnaider S., Rots V., Guérin G., Rendu W. On the Quina side: A Neanderthal bone industry at Chez-Pinaud site, France // *PLOS ONE*. – 2023. – Vol. 18 (6). – e0284081. – doi:10.1371/journal.pone.0284081

Bernardini F., Velicogna M., De Min A., Barago N. Exploring pottery technology and mineralogical, petrographic and chemical composition at the Neolithic pile-dwelling site of Palù di Livenza in north-east Italy // *Archaeological and Anthropological Sciences*. – 2024. – Vol. 16. – doi:10.1007/s12520-024-02043-z

Bettuzzi M., Casali F., Morigi M.P., Brancaccio R., Carson D., Chiari G., Maish J. Computed tomography of a medium size Roman bronze statue of Cupid // *Applied Physics A*. – 2015. – Vol. 118. – P. 1161–1169. – doi:10.1007/s00339-014-8799-z

Bukreeva I., Mittone A., Bravin A., Festa G., Alessandrelli M., Coan P., Formoso V., Agostino R.G., Giocondo M., Ciuchi F., Fratini M., Massimi L., Lamarra A., Andreani C., Bartolino R., Gigli G., Ranocchia G., Cedola A. Virtual Unrolling and Deciphering of Herculaneum Papyri by X-Ray Phase-Contrast Tomography // *Sci. Reports*. – 2016. – Vol. 6 (1). – P. 27227. – doi:10.1038/SREP27227

Caloi I., Bernardini F. Revealing primary forming techniques in wheel-made ceramics with X-ray microCT // *Journal of Archaeological Science*. – 2024. – Vol. 169. – 106025. – doi:10.1016/j.jas.2024.106025

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. – P. 1323–1341.

Geijer H., Ndongozi F., Edvardsson J. Dendrochronology with a Medical X-Ray Photon Counting Computed Tomography Scanner // *Dendrochronologia*. – 2024. – Vol. 126233. – doi:10.1016/j.dendro.2024.126233

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 highresolution X-ray microtomography: a pilot study on the late Mesolithic to Neolithic site Hamburg-Boberg // *J. of Archaeol. Sci.* – 2012. – Vol. 39 (7). – P. 2206–2219. – doi:10.1016/j.jas.2012.02.029
- Kozatsas J., Kotsakis K., Sagris D., David K.** Inside out: Assessing pottery forming techniques with micro-CT scanning. An example from Middle Neolithic Thessaly // *J. of Archaeol. Sci.* – 2018. – Vol. 100. – P. 102–119. – doi:10.1016/j.jas.2018.10.007
- Kozhevnikova D. V., Chistyakov P. V., Zotkina L. V., Kolobova K. A.** From Neolithic to contemporary times: persistent use patterns of needle cases in Northeast Asia // *Archaeological and Anthropological Science.* – 2025. – Vol. 17 (192). – doi:10.1007/s12520-025-02304-5
- Krivoshapkin A. L., Chikisheva T. A., Zubova A. V.** Trepanations in the population of the Altai Mountains in the Vth – IIIrd centuries B.C. // *Voprosy Neirokhirurgii imeni N. N. Burdenko.* – 2014. – Vol. 78 (3). – P. 62–71.
- Kulkova M. A., Kulkov A. M.** Investigations of Early Neolithic ceramics from Eastern Europe by X-Ray microtomography and petrography // *Microscopy and Analysis.* – 2015. – Vol. 136. – P. 7–10.
- Kulkova M. A., Kulkov A. M.** The identification of organic temper in Neolithic pottery from Russia and Belarus // *The Old Pooter's Almanack.* – 2016. – Vol. 21 (1). – P. 2–12.
- 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. – P. 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. – Vol. 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.** DECT for the non-destructive analysis of ancient ceramics // *Archaeometry.* – 2014. – Vol. 56. – P. 573–590. – doi:10.1111/arc.12035
- Miles J., Mavrogordato M., Sinclair I., Hinton D., Boardman R., Earl G.** The Use of Computed Tomography for the Study of Archaeological Coins // *J. of Archaeol. Sci.: 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). – P. 5895. – doi:10.1038/NCOMMS6895
- Murphy W. A., Nedden D., Gostner P., Knapp R., Recheis W., Seidler H.** The Iceman: Discovery and Imaging // *Radiology.* – 2003. – Vol. 226. – P. 614–629. – doi:10.1148/radiol.2263020338
- 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). – doi:10.1186/s40494-015-0033-6
- Reedy C. L., Reedy C. L.** Micro-Computed Tomography with 3D Image Analysis to Reveal Firing Temperature Effects on Pore Systems in Archaeological and Ethnographic Ceramics // *Applied Sciences.* – 2022. – Vol. 12. – P. 11448.
- Stabile S., Palermo F., Bukreeva I., Mele D., Formoso V., Bartolino R., Cedola A.** A Computational Platform for the Virtual Unfolding of Herculaneum Papyri // *Sci. Reports.* – 2021. – Vol. 11 (1). – P. 1582. – doi:10.1038/s41598-020-80458-z
- Stelzner J., Gauß F., Schuetz P.** X-ray computed tomography for non-destructive analysis of early Medieval swords // *Studies in Conservation.* – 2016. – Vol. 61 (2). – P. 86–101. – doi:10.1179/2047058414Y.0000000157
- 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 // *Sci. Reports.* – 2016. – Vol. 6 (1). – P. 20763. – doi:10.1038/SREP20763
- Xi Y., Ling X., Chen L., Li N., Wang H., Wang J.** From the grave to the lab: evaluation of archaeological human bone preservation based on micro-computed tomography analysis // *Heritage Science.* – 2024. – Vol. 12. – doi:10.1186/s40494-024-01284-4

References

- Abel R. L., Parfitt S., Ashton N., Lewis S. G., Scott B., Stringer C.** Digital preservation and dissemination of ancient lithic technology with modern micro-CT. *Computers & Graphics.* 2011. Vol. 35 (4). P. 878–884. doi:10.1016/j.cag.2011.03.001
- Albertin F.** X-ray tomography for manuscripts. *Umanistica Digitale*, 2022. No. 12. P. 39–64.
- Baumann M., Plisson H., Maury S., Renou S., Coqueugniot H., Vanderesse N., Kolobova K., Shnaider S., Rots V., Guérin G., Rendu W.** On the Quina side: A Neanderthal bone industry at Chez-Pinaud site, France. *PLOS ONE*, 2023. Vol. 18 (6). e0284081. doi:10.1371/journal.pone.0284081
- Bernardini F., Velicogna M., De Min A., Barago N.** Exploring pottery technology and mineralogical, petrographic and chemical composition at the Neolithic pile-dwelling site of Palù di Livenza in north-east Italy. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2024. Vol. 16. doi:10.1007/s12520-024-02043-z
- Bocharova E. N., Kozhevnikova D. V., Kolobova K. A.** Possibilities and Prospects of CT and Micro-CT Applications in Archaeological Research. *Siberian Historical Research*, 2025a. Vol. 3. P. 152–173. (In Russ.). doi:10.17223/2312461X/49/8
- Bocharova E. N., Kozhevnikova D. V., Kolobova K. A.** The Use of Microtomography for Studying Composite Slotted Tools. *Stratum plus*, 2025b. Vol. 1. P. 285–300. (In Russ.). doi:10.55086/sp251285300
- Bettuzzi M., Casali F., Morigi M. P., Brancaccio R., Carson D., Chiari G., Maish J.** Computed tomography of a medium size Roman bronze statue of Cupid. *Applied Physics A*, 2015. Vol. 118. P. 1161–1169. doi:10.1007/s00339-014-8799-z
- Bukreeva I., Mittone A., Bravin A., Festa G., Alessandrelli M., Coan P., Formoso V., Agostino R. G., Giocondo M., Ciuchi F., Frattini M., Massimi L., Lamarra A., Andreani C., Bartolino R., Gigli G., Ranocchia G., Cedola A.** Virtual Unrolling and Deciphering of Herculaneum Papyri by X-Ray Phase-Contrast Tomography. *Scientific Reports*, 2016. Vol. 6 (1). P. 27227. doi:10.1038/SREP27227
- Caloi I., Bernardini F.** Revealing primary forming techniques in wheel-made ceramics with X-ray microCT.

Derevyanko A. P., Molodin V. I., Shunkov M. V., Anoin A. A. Archaeological Study of the Holocene Layers of Denisova Cave. In *Problems of Archaeology, Ethnography, Anthropology of Siberia and Neighboring Territories*. Novosibirsk: IAET SB RAS Publ., 1999. Vol. 5. P. 348–353. (In Russ.).

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. P. 1323–1341.

Geijer H., Ndongozi F., Edvardsson J. Dendrochronology with a Medical X-Ray Photon Counting Computed Tomography Scanner. *Dendrochronologia*, 2024. Vol. 126233. doi:10.1016/j.dendro.2024.126233

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 highresolution X-ray microtomography: a pilot study on the late Mesolithic to Neolithic site Hamburg-Boberg. *J. of Archaeol. Sci.*, 2012. Vol. 39 (7). P. 2206–2219. doi:10.1016/j.jas.2012.02.029

Kozatsas J., Kotsakis K., Sagris D., David K. Inside out: Assessing pottery forming techniques with micro-CT scanning. An example from Middle Neolithic Thessaly. *J. of Archaeol. Sci.*, 2018. Vol. 100. P. 102–119. doi:10.1016/j.jas.2018.10.007

Kozhevnikova D., Chistyakov P., Zotkina L., Kolo-bova K. From neolithic to contemporary times: persistent use patterns of needle cases in Northeast Asia. *Archaeological and Anthropological Science*, 2025. Vol. 17 (192). doi:10.1007/s12520-025-02304-5

Krivoshapkin A. I., Chikisheva T. A., Zubova A. V. Trepanations in the population of the Altai Mountains in the Vth–IIIrd centuries B.C. *Voprosy Neirokhirurgii imeni N. N. Burdenko*, 2014. Vol. 78 (3). P. 62–71.

Kulkova M. A., Kulkov A. M. Investigations of Early Neolithic ceramics from Eastern Europe by X-Ray microtomography and petrography. *Microscopy and Analysis*, 2015. Vol. 136. P. 7–10.

Kulkova M. A., Kulkov A. M. The identification of organic temper in Neolithic pottery from Russia and Belarus. *The Old Pooter's Almanack*, 2016. Vol. 21 (1). P. 2–12.

Kulkov A. M., Kulkova M. A., Kashuba M. T. Plant Remains in Ceramics of the Late Bronze – Early Iron Age of the Northern Black Sea Region According to Computer Microtomography (M-CT) Data. In *Problems of Archaeology and Ethnohistory of Eastern Europe, Siberia and Northeast Asia*. Ufa: ANO Eurasian Museum of Nomadic Civilizations, 2025. P. 79–82. (In Russ.).

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. P. 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. Vol. 45. P. 323–331. doi:10.1007/s00256-015-2266-6

Lipkin S., Karjalainen V.-P., Puolakka H.-L., Finnili 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

Loman V. G. X-ray Computed Tomography in the Study of Ceramic Vessels. In *Brief Communications of the Institute of Archaeology*, 2020. Vol. 259. P. 425–435. (In Russ.).

McKenzie-Clark J., Magnussen J. DECT for the non-destructive analysis of ancient ceramics. *Archaeometry*, 2014. Vol. 56. P. 573–590. doi:10.1111/arc.12035

Mednikova M. B. Postcranial Morphology and Taxonomy of Representatives of the Genus Homo from Okladnikov Cave in Altai. Novosibirsk: IAET SB RAS Publ., 2011. 128 p. (In Russ.).

Miles J., Mavrogordato M., Sinclair I., Hinton D., Boardman R., Earl G. The Use of Computed Tomography for the Study of Archaeological Coins. *J. of Archaeol. Sci. 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). P. 5895. doi:10.1038/NCOMMS6895

Murphy W. A., Nedden D., Gostner P., Knapp R., Recheis W., Seidler H. The Iceman: Discovery and Imaging. *Radiology*, 2003. Vol. 226. P. 614–629. doi:10.1148/radiol.2263020338

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). doi:10.1186/s40494-015-0033-6

Reedy C. L., Reedy C. L. Micro-Computed Tomography with 3D Image Analysis to Reveal Firing Temperature Effects on Pore Systems in Archaeological and Ethnographic Ceramics. *Applied Sciences*, 2022. Vol. 12. P. 11448.

Shunkov M. V., Kozlikin M. B., Ulianov V. A., Fedorchenko A. Y., Chekha A. N., Bocharova E. N. New Research Results on the Holocene Sediments from the South Chamber of Denisova Cave. In *Problems of Archaeology, Ethnography, Anthropology of Siberia and Neighboring Territories*, 2017. Vol. XXIII. P. 457–458. (In Russ.).

Stabile S., Palermo F., Bukreeva I., Mele D., Formoso V., Bartolino R., Cedola A. A Computational Platform for the Virtual Unfolding of Herculaneum Papyri. *Sci. Reports*, 2021. Vol. 11(1). P. 1582. doi:10.1038/s41598-020-80458-z

Stelzner J., Gauß F., Schuetz P. X-ray computed tomography for non-destructive analysis of early Medieval swords. *Studies in Conservation*, 2016. Vol. 61 (2). P. 86–101. doi:10.1179/2047058414Y.00000000157

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. *Sci. Reports*, 2016. Vol. 6 (1). P. 20763. doi:10.1038/SREP20763

Xi Y., Ling X., Chen L., Li N., Wang H., Wang J. From the grave to the lab: evaluation of archaeological human bone preservation based on micro-computed tomography analysis. *Heritage Science*, 2024. Vol. 12. doi:10.1186/s40494-024-01284-4

Бочарова Е. Н. <https://orcid.org/0000-0002-7961-0818>

Кожевникова Д. В. <https://orcid.org/0000-0002-4655-7977>

Павленок Г. Д. <https://orcid.org/0000-0003-3727-776X>

Колобова К. А. <https://orcid.org/0000-0002-5757-3251>

Дата сдачи рукописи: 14.05.2026 г.