

Е.Н. Бочарова¹, П.В. Чистяков¹✉, Л.В. Зоткина¹,
Д.Н. Лохов²

¹Институт археологии и этнографии СО РАН
Новосибирск, Россия

²Иркутский государственный университет
Иркутск, Россия
E-mail: pavelchist@gmail.com

Использование 3D-моделирования для реконструкции артефактов с зеркальной симметрией

В статье описаны процедуры восстановления поврежденной археологической костяной обоймы с использованием программного обеспечения Geomagic Design X и методов трехмерного моделирования. Создание трехмерных моделей и высокоточные измерения на их основе увеличивают точность и обеспечивают возможность верификации результатов исследования. Реконструкция артефактов опирается на использование зеркальной симметрии и выявление идентичных частей предмета в случае выделения оси симметрии. Наличие оси симметрии позволяет предполагать идентичность частей с близким или 100 % совпадением после совмещения. Процедура предполагает визуализацию поврежденной костяной обоймы на основе сохранившихся частей. Для реконструкции был использован фрагмент составного орудия, найденного на стоянке Усть-Ёдарма II (Северное Приангарье), один из бортов паза которого обломан, второй сохранился практически полностью. Используя методы 3D-моделирования, удалось восстановить сломанный борт паза орудия. Процесс реконструкции основан на создании серии поперечных сечений, максимально повторяющих геометрию артефакта и определении оси симметрии для последующего отражения объектов относительно нее. Алгоритм построен на повторении процесса для всех созданных сечений с возможностью редактирования в ходе работы. Предложенный алгоритм может успешно применяться ко всем предметам, обладающим осью симметрии. Несмотря на ограничения и технические сложности, данная методика предоставляет новые инструменты для реконструкции артефактов, особенно в случаях утери или повреждения их частей. Дальнейшие исследования и усовершенствование методики могут привести к более точным результатам реконструкции и расширению ее применения в археологии.

Ключевые слова: 3D-моделирование, Усть-Ёдарма, 3D-сканирование, составные костяные орудия, реконструкция.

E.N. Bocharova¹, P.V. Chistyakov¹✉, L.V. Zotkina¹,
D.N. Lohov²

¹Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS
Novosibirsk, Russia

²Irkutsk State University
Irkutsk, Russia
E-mail: pavelchist@gmail.com

Use of 3D Modeling for Reconstructing the Artifacts with Mirror Symmetry

This article describes reconstruction of a composite slotted bone artifact using Geomagic Design X software and 3D modeling techniques. Three-dimensional models and multiple measurements based on them enhance the accuracy and verification of research results. Reconstruction of archaeological artifacts uses mirror symmetry and identifies the identical parts of the object if symmetry axis is present. A symmetry axis makes it possible to imply the identity of the parts with close or 100% coincidence after putting them together. The experiment involved visualizing a damaged composite slotted bone tool found at the Ust-Yodarma II site (Northern Angara region) using its surviving parts. One side of the slot has been broken, while the other side has been almost entirely preserved. Application of 3D modeling methods made it possible to reconstruct the damaged side of the slot. The reconstruction process was based on generating cross-sections which would be as close as possible to artifact's geometry and determining the axis of symmetry for the subsequent mirroring of objects relative to it. The algorithm was structured to reiterate the process for all generated cross-

sections with the capacity for editing during work. The proposed algorithm can be successfully applied to objects with axes of symmetry not limited to composite slotted bone artifacts. Despite some limitations and technical complexities, this methodology offers new tools for reconstructing archaeological artifacts, particularly in cases of loss or damage. Further research and refinement of the methodology may result in more accurate reconstructions and its expanded application in archaeology.

Keywords: 3D modelling, Ust-Yodarma, 3D scanning, composite bone tools, reconstruction.

Методы трехмерного моделирования в археологии активно развиваются и используются учеными в своих исследованиях. Это развитие позволяет проводить более глубокий анализ археологических артефактов, например, восстанавливать потерянные или разрушенные части с более высокой точностью, чем ранее это было доступно реставраторам. Трехмерное сканирование активно применяется для моделирования и последующего не инвазивного анализа артефактов, например предоставляя возможность создавать точные продольные и поперечные сечения объектов, что особенно полезно при исследовании хрупких предметов. Важным преимуществом трехмерного моделирования является возможность восстановления облика потерянных или разрушенных частей артефактов. Главный принцип реконструкции археологических предметов связан с выявлением оси симметрии, которая позволяет зеркально отображать предметы и восстанавливать их части. Зеркальная симметрия основывается на специфическом расположении совпадающей локальной информации. При наличии у предмета оси симметрии ученые могут предположить, что одна из частей будет идентична другой части и при совмещении этих частей совпадение будет близко или равно 100 %. Метод реконструкции, основанный на выявлении оси симметрии артефактов, активно применяется к керамическим изделиям [Karasić, Smilansky 2008; Stamatoopoulos, Anagnostopoulos, 2016], а также к разнообразным объектам, включая предметы искусства [Kolobova et al., 2019], каменные артефакты и другие [Freidline et al., 2012; Chen et al., 2019]. В предлагаемой статье трехмерное моделирование применяется для реконструкции борта паза костяного составного орудия.

Исследование пазовых орудий представляет собой сложную задачу, так как небольшой размер пазов усложняет проведение точных мануальных измерений. Для преодоления этой сложности в археологических исследованиях успешно применяется трехмерное сканирование и компьютерная томография. Эти методы позволяют создавать трехмерные модели пазовых орудий, которые, в свою очередь, могут быть подвергнуты неинвазивной обработке [Miles et al., 2016; Vigorelli et al., 2022], включая возможность получения точных продольных и поперечных сечений. Такой подход имеет важное значение для анализа метрических характеристик и классификации орудий, а также для реконструкции процессов их изготовления [Бочарова, Чистяков, Жданов, 2021].

Фрагмент составного пазового костяного орудия происходит из комплекса местонахождения Усть-

Ёдарма II, в устье р. Ёдармы, левого притока р. Ангары (Усть-Илимский р-н Иркутской обл.), в 91 км на север от нижнего бьефа плотины Усть-Илимской ГЭС [Лохов, Липнина, Дударек, 2023]. В настоящее время объект затоплен водами Богучанского водохранилища. За время спасательных работ 2009–2012 гг. на местонахождении вскрыты три толщи геологических образований субаквально-субаэральных отложений делювиального генезиса: позднего – раннего голоцена и верхнего плейстоцена, содержащих 12 уровней в интервале от начала верхнего палеолита до Средневековья (время освоения региона русскими первопроходцами в XVII–XVIII вв.) – этнографической современности (середина XX в.). Культуросодержащие уровни 1–4 отнесены к периодам от эпохи Средневековья до ранней бронзы – позднего неолита. Уровни 5–8 представлены артефактами эпохи неолита, уровни 9 и 10 содержат остатки материальной культуры мезолитического времени, уровни 11 и 12 – верхний палеолит [Там же].

Фрагмент происходит из уровня 7. Для этого уровня была получена серия из шести AMS-дат в диапазоне $6705 \pm 85 - 7007 \pm 54$ л.н., что по региональной хронологической шкале относится к раннему неолиту, что также подтверждается обликом археологических находок этого уровня [Там же].

Представленный археологический фрагмент артефакта является облоймой составного орудия, предположительно изготовленной из ребра млекопитающего. У фрагмента один из бортов паза обломан, второй сохранился практически полностью, разрушена небольшая часть на месте слома двух фрагментов. В проксимальной части фрагмента наблюдаются следы пиления, которые проходят поперечно с обеих сторон (рис. 1, 1). По внешнему краю со стороны обломанного борта паза отмечается яркий люстраж. На самой кромке сохранившегося борта паза, в том числе с внутренней стороны, фиксируется яркий блеск. Дистальная часть практически не обработана.

Сканирование осуществлялось сканером структурированного подсвета Range Vision Spectrum 3.1, с использованием поворотного стола без маркеров. Сканирование и дальнейшая обработка проводились при использовании стандартного протокола для сканирования артефактов сканерами структурированного подсвета [Чистяков и др., 2019; Колобова и др., 2020; Чистяков, Бочарова, Колобова, 2021]. Разработка алгоритма и реконструкция борта паза проводилась в программе Geomagic Design X.

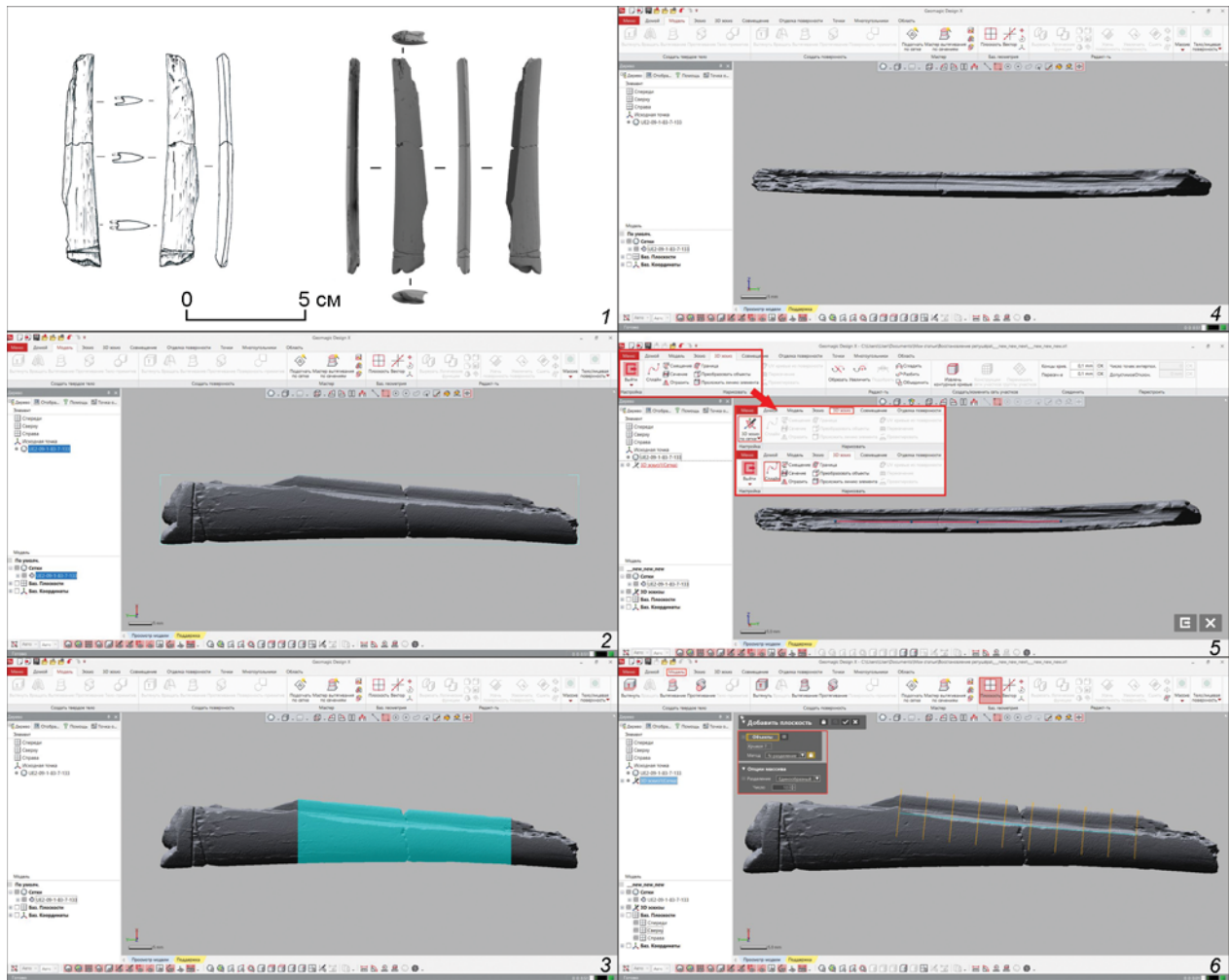


Рис. 1. Восстановление паза составного пазового орудия со стоянки Усть-Ёдарма.

1 – составное пазовое орудие со стоянки Усть-Ёдарма; 2 – интерфейс программы Geomagic Design X; 3 – определение восстанавливаемой области; 4 – составное пазовое орудие со стоянки Усть-Ёдарма, вид сверху; 5 – пример использования инструмента «Спллайн»; 6 – пример использования инструмента «Плоскость».

Разработанный алгоритм представляет собой попытку реконструкции борта паза костяной обоймы на основе отражения имеющихся частей обоймы. Важно отметить, что процесс восстановления в настоящее время не полностью завершен и требует дополнительных исследований и доработки.

Начальный этап работы включает в себя открытие объекта в Geomagic Design X, представленного в формате *.stl (рис. 1, 2). Затем определяется область, в которой будет проводиться восстановление. При этом в эту область должна быть включена часть сохранившегося участка предмета для возможности проецирования этой части на участки, которые не сохранились (рис. 1, 3). Далее намечаем места будущих поперечных сечений, используя инструмент «Плоскость» на тех участках, которые требуют восстановления / где будут далее созданы сечения. При анализе паза видно, что он не является идеально прямым (рис.1, 4). Созданные плоскости должны максимально близко повторять оригинальный изгиб объекта. Чтобы избежать

искажений, мы создаем сплайн-линию, т.е. линию, которая соединяет несколько точек, отмеченных по центру самой глубокой части паза, в местах, где форма отклоняется от условной прямой. Для этого используем инструмент «Спллайн» в разделе «3D эскиз» и рисуем линию на участке, который требует восстановления (рис. 1, 5). Затем создаются плоскости в местах будущих поперечных сечений относительно этой линии с использованием инструмента «Плоскость» (в сегменте «Базовая Геометрия») в разделе «Модель», где выбирается метод «N-разделение» (рис. 1, 6) и указывается количество плоскостей (в данном случае 10).

Необходимо создать сечения на только что созданных плоскостях с использованием инструмента «Эскиз по сетке» в разделе «Эскиз». В появившемся меню выбирается нужная плоскость и не вносятся никакие изменения (рис. 2, 1). Таким образом мы получили поперечные сечения. Для дальнейшей работы создается эскиз с полученного сечения. Сечение может быть отредактировано вручную или с ис-

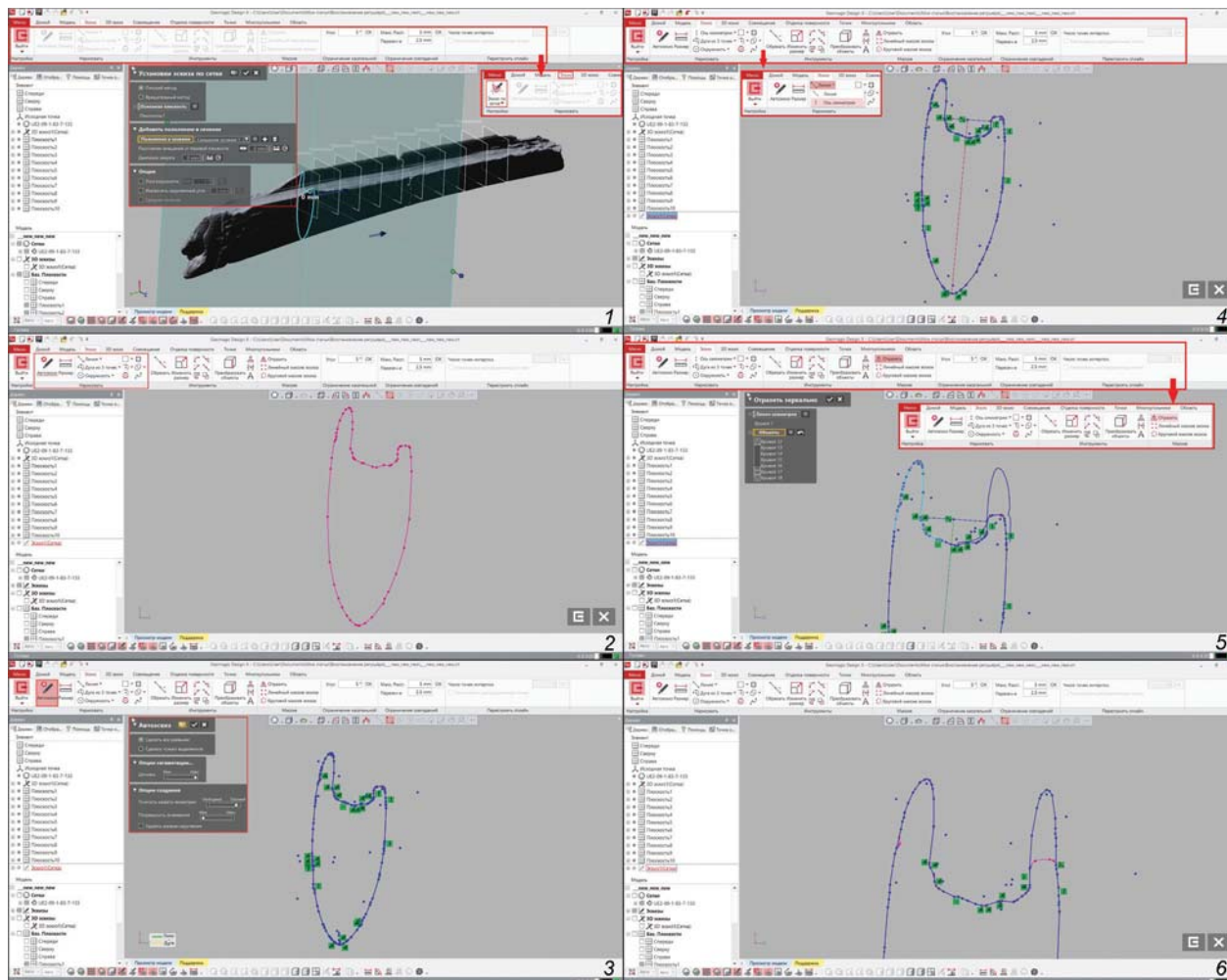


Рис. 2. Последовательность действий при восстановлении паза составного пазового орудия со стоянки Усть-Ёдарма.

1 – пример использования инструмента «Эскиз по сетке»; 2 – пример использования инструмента «Автоэскиз»; 3 – настройки инструмента «Автоэскиз»; 4 – пример использования инструмента «Ось симметрии»; 5 – пример использования инструмента «Отразить»; 6 – промежуточный результат восстановления паза составного пазового орудия со стоянки Усть-Ёдарма.

пользованием функции «Автоэскиз» (рис. 2, 2), где параметры детализации устанавливаются на максимум, а погрешности – на минимум (рис. 2, 3). Стоит отметить, что в зависимости от сложности объекта и исследовательских задач эти параметры могут быть изменены.

Для определения центра паза и оси симметрии создается линия от самых дальних точек паза до нижней части с использованием инструмента «Ось симметрии» в разделе «Нарисовать» (рис. 2, 4). Эта линия будет представлять собой ось симметрии. Затем в разделе «Массив» находим инструмент «Отразить», выбираем ось симметрии и объекты для отражения (рис. 2, 5). После ось симметрии рекомендуется удалить, так как дальнейшие манипуляции с отраженными объектами могут повлиять на исходную модель. В процессе работы следует убедиться, что отраженные объекты не пересекаются с трещинами или повреждениями и их положение соответствует структуре оригинального паза (рис. 2, 6). Если это не так,

подогнать скопированные объекты к основанию реконструируемой части, при необходимости можно воспользоваться инструментами в разделах «Нарисовать» и «Инструменты».

Далее этот процесс повторяется для всех созданных плоскостей. Важно обратить внимание на левую колонку меню, где отображаются все созданные элементы, которые могут быть отредактированы в любой момент. Однако изменения одного элемента могут повлиять на другие, поэтому следует быть осторожным. В верхней части меню отображаются все элементы, созданные в ходе работы, которые могут быть отредактированы в любой момент, а в нижней части можно управлять видимостью элементов или групп элементов, что полезно при работе с большим количеством объектов.

Результат работы представляет модель костяной обоймы (рис. 3), с которой в дальнейшем можно проводить различные измерения. Стоит отметить, что это реконструкция облика с возможными погрешностями и стоит это учитывать при дальнейшем исследовании.

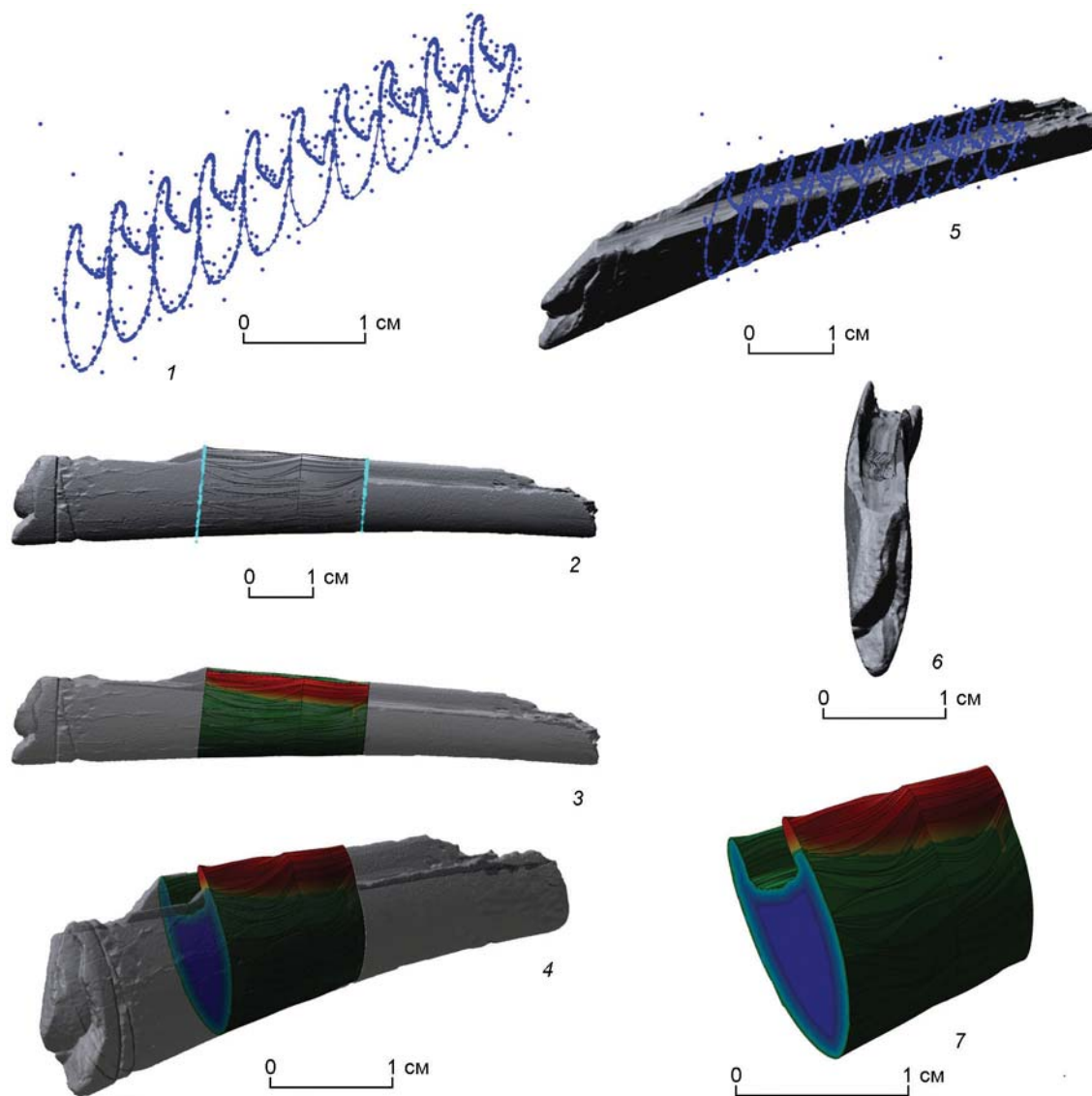


Рис. 3. Результат восстановления паза составного пазового орудия со стоянки Усть-Ёдарма.

1 – поперечные сечения восстановленной области; 2, 3 – составное орудие с выделенной восстановленной областью; 4 – восстановленная область с наложением на модель составного орудия; 5 – поперечные сечения, наложенные на модель составного орудия; 6 – профиль составного орудия с восстановленным бортом паза; 7 – восстановленная область, деталь.

Этот метод позволяет создавать реконструированные трехмерные модели артефактов с погрешностями в зеркальной симметрии на основе доступных данных. Несмотря на некоторые ограничения и технические сложности, данная методика предоставляет исследователям новые инструменты для реконструкции археологических артефактов, особенно в случаях, когда часть данных утеряна или повреждена. Дальнейшие исследования и совершенствование методики могут привести к более точным результатам и расширению сфер ее применения в археологических исследованиях и музейных технологиях.

Благодарности

Авторы выражают благодарность д-ру ист. наук, профессору РАН Колобовой К.А. за плодотворные дискуссии. 3D-сканирование, 3D-моделирование, аналитическая часть статьи подготовлены в рамках проекта НИР ИАЭТ СО РАН № FWZG-2022-0009 «Цифровизация процессов изучения древнейшей и древней истории Евразии». Радиоуглеродное датирование и описание находки выполнено в рамках проекта НИР ИГУ № FZZE-2023-0007 «Динамика и вариабельность палеотехнологий в каменном веке Байкальской Сибири в контексте культурных традиций и адаптивных стратегий».

Список литературы

Бочарова Е.Н., Чистяков П.В., Жданов Р.К. Применение трехмерного сканирования для исследования составных пазовых орудий раннего голоцена Восточной Сибири (на примере орудий из комплексов стоянки Казачка-1) // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. – Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2021. – Т. 27. – С. 57–65.

Колобова К.А., Шалагина А.В., Чистяков П.В., Бочарова Е.Н., Кривошапкин А.И. Возможности применения трехмерного моделирования для исследований комплексов каменного века // Сибирские исторические исследования. – 2020. – № 4. – С. 240–260.

Лохов Д.Н., Липнина Е.А., Дударёк С.П. Усть-Ёдарма II – опорное многослойное геoarхеологическое местонахождение в Северном Приангарье (по результатам работ 2009–2012 гг.) // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Геoarхеология. Этнология. Антропология. – 2023. – Т. 44. – С. 20–86.

Чистяков П.В., Бочарова Е.Н., Колобова К.А. Обработка трехмерных моделей археологических артефактов // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер.: История, филология. – 2021. – Т. 20, № 7. – С. 48–61.

Чистяков П.В., Ковалев В.С., Колобова К.А., Шалагина А.В., Кривошапкин А.И. 3D моделирование археологических артефактов при помощи сканеров структурированного подсвета // Теория и практика археологических исследований. – 2019. – № 3 (27). – С. 102–112

Chen F., Welker F., Shen Ch.-Ch., Bailey Sh.E., Bergmann I., Davis S., Xia H., Wang H., Fischer R., Freidline S.E., Yu T.-L., Skinner M.M., Stelzer S., Dong G., Fu Q., Dong G., Wang J., Zhang D., Hublin J.-J. A late Middle Pleistocene Denisovan mandible from the Tibetan Plateau // *Nature*. – 2019. – Vol. 569. – P. 409–412.

Freidline S.E., Gunz P., Janković I., Harvati K., Hublin J.J. A comprehensive morphometric analysis of the frontal and zygomatic bone of the Zuttiyeh fossil from Israel // *J. of Human Evolution*. – 2012. – Vol. 62. – P. 225–241.

Karasik A., Smilansky U. 3D scanning technology as a standard archaeological tool for pottery analysis: practice and theory. // *J. of Archaeol. Sci.* – 2008. – Vol. 35. – P. 1148–1168.

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. – Vol. 4 (47). – P. 66–76.

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.

Stamatopoulos M.I., Anagnostopoulos C. 3D digital reassembling of archaeological ceramic pottery fragments based on their thickness profile. // *CoRRabs/1601.05824*. – 2016. – URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1601/1601.05824.pdf> (дата обращения 15.08.2023).

Vigorelli L., Re A., Buscaglia P., Manfreda N., Nervo M., Cavaleri T., Del Vesco P., Borla M., Grassini S., Guidorzi L., Lo Giudice A. Comparison of two ancient Egyptian Middle Kingdom statuettes from the Museo Egizio of Torino through computed tomographic measurements // *J. of Archaeol. Sci.: Reports*. – 2022. – Vol. 44. – 103518.

References

Chen F., Welker F., Shen Ch.-Ch., Bailey Sh.E., Bergmann I., Davis S., Xia H., Wang H., Fischer R., Freidline S.E., Yu T.-L., Skinner M.M., Stelzer S., Dong G., Fu Q., Dong G., Wang J., Zhang D., Hublin J.-J. A late Middle Pleistocene Denisovan mandible from the Tibetan Plateau. *Nature*, 2019. Vol. 569. P. 409–412.

Freidline S.E., Gunz P., Janković I., Harvati K., Hublin J.J. A comprehensive morphometric analysis of the frontal and zygomatic bone of the Zuttiyeh fossil from Israel. *Journal of Human Evolution*, 2012. Vol. 62. P. 225–241.

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. Vol. 4 (47). P. 66–76.

Kolobova K.A., Shalagina A.V., Chistyakov P.V., Bocharova E.N., Krivoshapkin A.I. Three-dimensional modelling application for studying Stone Age assemblages. *Siberian Historical Research*, 2020. Vol. 4. P. 240–260. (In Russ.).

Lokhov D.N., Lipnina E.A., Dudarek S.P. Ust-Yodarma 2 – a Reference Multilayered Geoarchaeological Site in the Northern Angara Region (Based on the Results of Work in 2009–2012). *Bulletin of the Irkutsk State University. Geoarchaeology, Ethnology, and Anthropology Series*, 2023. Vol. 44. P. 20–86. (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. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2016. Vol. 6. P. 35–41.

Stamatopoulos M.I., Anagnostopoulos C. 3D digital reassembling of archaeological ceramic pottery fragments based on their thickness profile. *CoRRabs/1601.05824*. 2016. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1601/1601.05824.pdf> (Accessed:15.08.2023).

Vigorelli L., Re A., Buscaglia P., Manfreda N., Nervo M., Cavaleri T., Del Vesco P., Borla M., Grassini S., Guidorzi L., Lo Giudice A. Comparison of two ancient Egyptian Middle Kingdom statuettes from the Museo Egizio of Torino through computed tomographic measurements. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2022. Vol. 44. 103518.

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

Чистяков П.В. <https://orcid.org/0000-0001-7036-7092>

Зоткина Л.В. <https://orcid.org/0000-0002-1912-3882>

Лохов Д.Н. <https://orcid.org/0000-0002-1249-0882>