

## MISCELLANEA

УДК 902.4; 519.876.5  
DOI: 10.17223/2312461X/30/12

### ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КОМПЛЕКСОВ КАМЕННОГО ВЕКА

---

Ксения Анатольевна Колобова,  
Алена Владимировна Шалагина,  
Павел Вячеславович Чистяков,  
Екатерина Николаевна Бочарова,  
Андрей Иннокентьевич Кривошапкин

**Аннотация.** Развитие цифровых технологий обусловило их активное применение в гуманитарных дисциплинах, прежде всего в археологии. В предлагаемой статье рассматриваются новые возможности и перспективы использования трехмерного моделирования при помощи сканеров структурированного подсвета с целью получения новых, ранее не доступных данных. Трехмерное сканирование имеет определенные преимущества в научном контексте перед методами фотограмметрии и компьютерной томографии, заключающиеся в применении относительно недорогого оборудования и возможности получения масштабированных трехмерных моделей, полностью соответствующих артефактам. Последние обстоятельства позволяют проведение абсолютно точных метрических измерений и любых процедур неразрушительного манипулирования моделями, что выводит археологические исследования на новый уровень, когда возможна верификация любых полученных данных и проведенных экспериментов, что скорее соответствует естественным, чем гуманитарным наукам. В последние годы были созданы или усовершенствованы ранее недоступные археологам исследовательские процедуры: трехмерный геометрико-морфометрический анализ, расчет объема / центра гравитации артефактов, прорисовка контуров негативов. Основные возможности новых методов исследований демонстрируются на примере трехмерных моделей артефактов из среднепалеолитических комплексов Чагырской пещеры (Горный Алтай).

**Ключевые слова:** трехмерное моделирование, сканеры структурированного подсвета, каменные орудия, костяные орудия, машинные измерения, расчет центра масс, геометрико-морфометрический анализ

Внутренняя логика развития археологической науки обусловила значительное расширение ее методологической базы, прежде всего за счет естественнонаучных методов. В последние годы развитие и постепенное удешевление технического оборудования позволили использовать возможности методов фотограмметрии, трехмерного сканирования

и томографии для создания многочисленных моделей археологических объектов и их дальнейшего применения в исследовательском процессе (Remondino, El-Hakim 2006; Remondino 2014; Garstki 2017).

Основными преимуществами трехмерного сканирования по сравнению с фотограмметрией являются высокая степень автоматизации, которая исключает влияние человеческого фактора на многих этапах оцифровки (Ahmed, Carter, Ferris 2014; Porter, Roussel, Soressi 2016). В результате отсутствует необходимость разработки и проведения контроля качества методики при оцифровке отдельных типов объектов (Georgopoulos 2017). Автоматизация обеспечивает высокое разрешение и точность моделей (Evgenikou, Georgopoulos 2015). Следующим преимуществом является получение масштабированных моделей, полностью соответствующих артефактам, что обуславливает широкие возможности получения научных данных (De Reu et al. 2013; Remondino 2014). С другой стороны, фотограмметрия не требует дорогостоящего оборудования и доступна практически всем исследователям (Mathys 2013; Heath 2015). В последнее время были созданы специализированные исследовательские протоколы, позволяющие со значительной долей достоверности масштабировать трехмерные модели, полученные при помощи фотограмметрии (Porter, Roussel, Soressi 2016). В свою очередь по сравнению с томографией трехмерное сканирование является более доступным в силу относительно низкой стоимости оборудования.

Первыми примерами применения сканирования объектов культурного наследия стали проекты по оцифровке статуй Микеланджело (Abouaf 1999) и произведений Донателло и Джованни Пизано (Beraldin et al. 1999). Самым масштабным стал проект «Микеланджело», в ходе осуществления которого была отсканирована статуя Давида в 2000 г. (Levoy et al. 2000). С этого времени начался период внедрения методов трехмерного сканирования в практику археологических исследований. За этот период оборудование совершенствовалось и удешевлялось.

Широкое применение методы 3D моделирования нашли в области исследования петроглифов. Посредством применения методов фотограмметрии и трехмерного сканирования исследователи активно документируют древние изображения, собирают новую информацию об определении ранее не видимых рисунков, их стратификации и технологии нанесения (Cassen et al. 2014; Zotkina, Kovalev 2019). Значительные научные результаты были получены при сканировании и исследовании трехмерных моделей объектов древнего искусства (Grosman, Ovadia, Bogdanovsky 2014; Counts, Averett, Garstki 2016; Morris, Peatfield, O'Neill 2018). Также фотограмметрия нашла широкое применение для научного документирования и изучения материалов каменного века на полевом этапе исследования (полевое документирование, топографические планы местности, планы раскопов и т.д.), а также при лаборатор-

ной обработке артефактов (метрические измерения, определение объема, измерение углов и т. д.) (Чжоу 2017).

В рамках исследования керамических изделий трехмерное сканирование активно применяется для моделирования и дальнейшего манипулирования моделями (возможность создания точных продольных и поперечных сечений без разрушения артефакта, исследование хрупких объектов) с целью классификации. Основным принцип исследования керамических артефактов основан на факте наличия оси симметрии, соответственно, все метрические параметры, такие как диаметр изделия, его сегменты, находятся в тесной взаимосвязи с осью модели (Karasik, Smilansky 2008, 2011). При исследовании керамики также значительное внимание уделяется возможности апплицирования цифровых моделей (Stamatopoulos, Anagnostopoulos 2016).

Предлагаемая статья освещает новые возможности изучения артефактов каменного века, которые предоставляет трехмерное моделирование при помощи сканеров структурированного подсвета. Демонстрация этих возможностей представлена на примере каменных и костяных орудий из среднепалеолитических комплексов Чагырской пещеры, расположенной на Алтае (Derevianko et al. 2015). В статье даются ссылки на наиболее распространенное программное обеспечение, позволяющее проводить с трехмерными моделями описываемые манипуляции.

### **Документирование и визуализация артефактов каменного века**

Основные способы создания трехмерных моделей при помощи сканеров структурированного подсвета и наиболее часто возникающие трудности представлены в нескольких работах в русскоязычной литературе (Вавулин, Зайцева, Пушкарев 2014, 2015; Чистяков и др. 2019).

В исследованиях материалов каменного века масштабированные 3D модели применяются для широкого круга задач. Первой и наиболее часто решаемой задачей трехмерного моделирования каменных артефактов является первичная визуализация. На рис. 1 представлены изображения бифасиального орудия из комплекса Чагырской пещеры в виде графического рисунка, фотографии и 3D модели. В случае получения высокоточной трехмерной модели она по своему качеству превосходит фотографию, поскольку лишена текстуры и приближена по содержанию к профессиональному графическому рисунку и не содержит субъективных ошибок (рис. 1).

Другой задачей, которая решается в мировой археологической практике, является документирование (Riel-Salvatore et al. 2004; Pastoors, Weniger 2011). В качестве возможных вариантов применения трехмерной визуализации является документирование археологических объектов в полевых условиях (McPherron, Gernat, Hublin 2009), трехмерное

моделирование в процессе раскопок для применения новых данных на начальных стадиях научных исследований (Puhar et al. 2018) и документирование в лабораторных условиях (Garstki 2017).



Рис. 1. Бифасиальное орудие из комплекса Чагырской пещеры: 1 – высококачественная фотография; 2 – трехмерная модель; 3 – графический рисунок

В рамках применения цифровых технологий были разработаны различные алгоритмы для автоматического позиционирования каменных артефактов, поскольку корректное позиционирование играет важную роль при документировании артефактов, метрических замерах и геометрико-морфометрическом анализе (Richardson et al. 2013; Herzlinger, Goren-Inbar, Grosman 2017; Шалагина и др. 2020).

Новой возможностью трехмерного моделирования является реконструкция первоначального облика артефактов, палеонтологических и антропологических образцов, в тех случаях когда возможно зеркальное отображение их частей. Так, данный алгоритм был применен при реконструкции утраченных частей черепа с нижнепалеолитической стоянки Зутиё (Израиль) (Freidline et al. 2012) и утраченных частей антропоморфной скульптуры со стоянки Турист-2 (Kolobova et al. 2019b). Самым известным примером зеркальной реконструкции антропологической находки стала челюсть денисовца из пещеры Байшия в Тибетском нагорье (Chen et al. 2019).

После создания качественных трехмерных моделей артефактов у исследователей появляется возможность перейти к научным исследованиям трехмерных моделей, позволяющих получать высокоточную верифицируемую информацию об артефакте.

### Новые возможности исследования трехмерных моделей

*Метрические измерения.* В результате применения трехмерного сканирования мы получаем масштабированную цифровую копию артефакта, полностью соответствующую оригиналу. Трехмерная модель позволяет проводить весь спектр манипуляций, связанных с метрическими измерениями, создавать продольные и поперечные сечения на трехмер-

ных моделях целых артефактов, получая культурно и технологически значимые морфологические характеристики.

Измерение трехмерных моделей позволяет избежать значительных ошибок, возникающих при мануальных измерениях артефактов, достигающих 20–25% от настоящих значений (Grosman, Smikt, Smilansky 2008), что обеспечивает верифицируемость проведенных исследований.

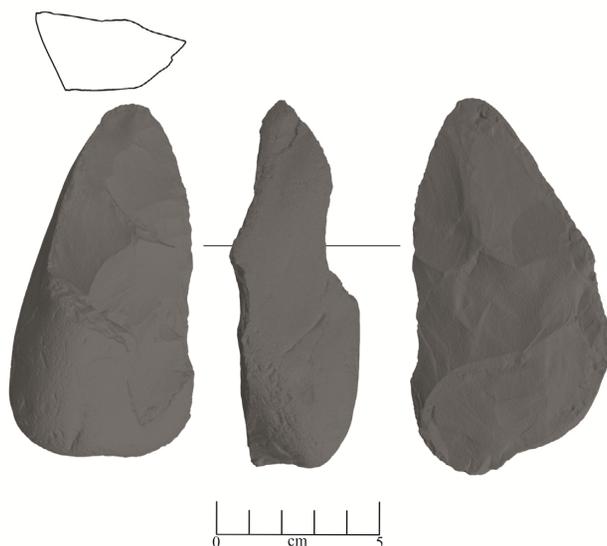


Рис. 2. Трехмерная модель каменного бифасиального орудия из комплекса Чагырской пещеры с поперечным сечением, полученным при ее сегментировании

На рис. 2 представлена трехмерная модель каменного плоско-выпуклого бифасиального орудия с поперечным сечением, полученным при ее сегментировании. Поскольку каменный артефакт изготовлен из зурсурийского яшмоида темного цвета (Derevianko et al. 2015), то рекомендуется его сканирование с белым матовым покрытием. Крутолатеральное поперечное сечение позволяет атрибутировать данное орудие как *Keilmesser*, обушковый бифасиальный нож – типологический маркер индустрий сибирячихинского варианта среднего палеолита Горного Алтая и микокских комплексов Центральной и Восточной Европы (Kolobova et al. 2019a). Создание поперечных сечений целых каменных артефактов является общепринятой практикой при создании графических рисунков, но несет значительную долю субъективных погрешностей.

Сочетание метрических измерений сколов и нуклеусов, включая количественную оценку выпуклости фронтов нуклеусов, из комплексов грота Ябруд-2 позволило исследователям количественно описать основные технологические изменения ахмарийской культуры Леванта в хронологической перспективе (Bretzke, Conard 2012).

На трехмерной модели артефакта также можно проводить замеры углов, более точные, чем при использовании угломеров. Значения угла рабочего лезвия у каменных орудий не одинаковы на всем протяжении лезвия. Поэтому в целях упрощения процесса обработки каменных орудий исследователи обычно предпочитали делать одно измерение (Колобова 2006). Как мы видим, значения угла на разных участках лезвия каменного бифасиального орудия могут значительно отличаться друг от друга (рис. 3). Поэтому с помощью различного программного обеспечения возможен расчет среднего значения угла для лезвия. Так, на приведенном примере значение угла лезвия бифасиального орудия варьирует от 62 до 87°, при этом среднее значение составляет 73°.

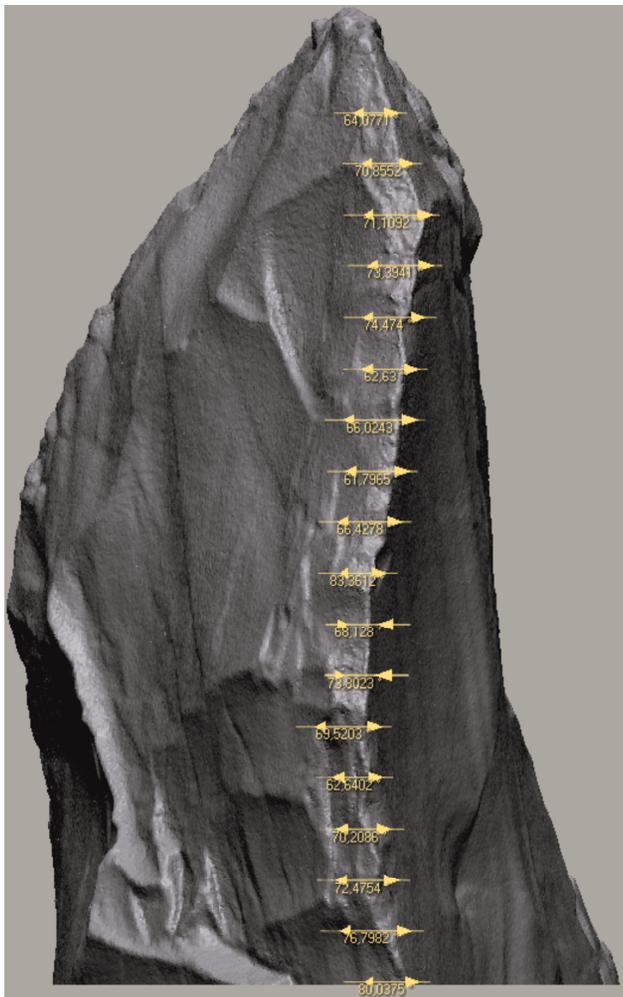


Рис. 3. Пример измерения угла лезвия каменного бифасиального орудия (Чагырская пещера)

Значение важности измерения углов сложно переоценить при оценке степени сработанности орудий (Clarkson, Hiskok 2008). Для исследования процессов первичного расщепления Чагырской пещеры измерялся угол между остаточной ударной площадкой и вентральной плоскостью сколов, в результате чего стало возможным разграничить процессы нуклеусного и бифасиального расщепления по продуктам дебитажу (Деревянко и др. 2018). Сочетание методов прорисовки границ негативов и метрических измерений углов трехмерных моделей создало условия для определения функции и причин поджигления скребел из среднепалеолитического комплекса Нешер Рамла в Леванте (Zaidner, Grosman 2015). Подобный алгоритм применялся группой французских исследователей для определения вариабельности шательперонских и протоориньякских нуклеусов, где они применяли комплекс метрических измерений и замеры углов нуклеусов на трехмерных моделях (Porter, Roussel, Soressi 2016).

Самой последней разработкой является алгоритм измерения среднего угла на определенном участке лезвия, когда с помощью программного алгоритма выбирается самый стабильный угол лезвия (на расстоянии 1, 2 либо 3 мм от края лезвия). Так Ф. Валетта с соавторами удалось, используя этот алгоритм в разрабатываемом программном обеспечении 3D Artifact, установить вариабельность углов различных геометрических микролитов Леванта и связать их с различными культурными традициями (Valletta et al. 2020).

Создание всевозможных сечений, метрические измерения и измерения углов доступны практически в любом программном обеспечении, работающем с трехмерными моделями. Наиболее удобными с пользовательской точки зрения являются Geomagic Wrap, Geomagic Design X., Autodesk Netfabb и MeshLab. Специальным программным обеспечением, адаптированным для нужд исследователей каменного века, является программа Artefact 3D, разработанная сотрудниками лаборатории компьютерной археологии Еврейского университета (Grosman et al. 2008).

*Построение карты кривизны сетки.* Новым инструментом, позволяющим визуализировать и исследовать артефакты каменного века, является построение карты кривизны сетки на основе трехмерной модели. Карта кривизны сетки показывает разницу высот на поверхности артефакта, которая делается на основе оригинальной модели и ее измененной копии. Наиболее перспективным направлением в настоящий момент является изучение слабомодифицированных орудий – ретушеров и отбойников, выполненных на каменном и костяном сырье (Caricola et al. 2018). В процессе построения карты появляется возможность для измерения степени модификации, активных зон орудий данного типа. На рис. 4 приведен пример карты кривизны сетки костяного ретушера из комплекса Чагырской пещеры с несколькими активными

зонами. Построение карты осуществлялось в программе Geomagis Design X (пункт «Кривизна»). Карта кривизны показывает глубину «лунок» и «ямок», появившихся в результате соприкосновения с ретушируемым каменным орудием (Колобова, Маркин Чабай 2016).

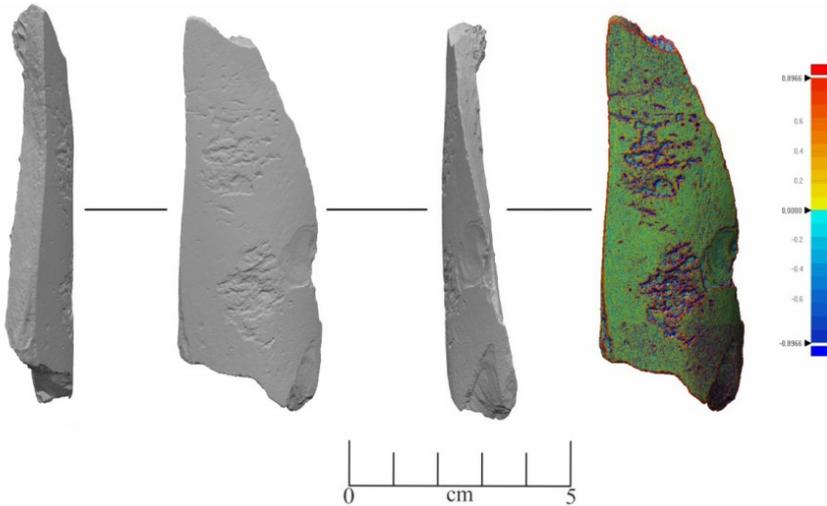


Рис. 4. Костяной ретушер из комплекса Чагырской пещеры с картой кривизны сетки

*Расчет центра масс.* Трехмерные модели каменных артефактов позволяют проводить вычисления, ранее невозможные или связанные со значительными трудозатратами. Одной из таких возможностей, предоставляемых новым методом, является подсчет центра гравитации.

Центром масс / гравитации называется геометрическая точка, связанная с твердым телом, через которую проходит равнодействующая всех сил тяжести, действующих на частицы этого тела при любом положении последнего в пространстве. Способ подсчета центра масс был представлен в работе, описывающей реконструкцию функции антропоморфной скульптуры со стоянки бронзового века Южной Сибири (Kolobova et al. 2019b). Также расчет центра масс был применен для определения функции неолитических масок (Grosman, Ovadia, Bogdanovsky 2014).

Исследователи из Еврейского университета провели классификацию нижнепалеолитических ручных рубил из комплексов Ближнего Востока на основе подсчета расстояния между центром гравитации и центром симметрии, вычисленным на трехмерных моделях артефактов. В соотношении с объемом артефактов, определенных тем же способом, удалось составить точечный график, описывающий физические свойства и степень сработанности нижнепалеолитических ручных рубил (Grosman et al. 2008).

На рис. 5 представлено бифасиальное орудие из комплекса Чагырской пещеры с рассчитанным центром массы.

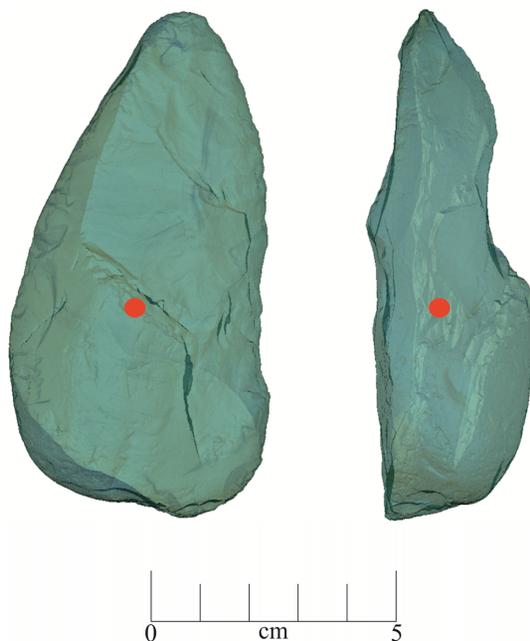


Рис. 5. Трехмерная модель бифасиального орудия из комплекса Чагырской пещеры с рассчитанным центром массы

Наиболее удобные процедуры определения центра масс представлены в программах Geomagic Wrap и 3D Artifact.

*Определение объема трехмерной модели.* Объем трехмерной модели в настоящее время рассматривается и как самостоятельная количественная характеристика артефактов (Porter, Roussel, Soressi 2016), и как дополнительная количественная характеристика для описания морфологической и технологической вариабельности каменных предметов (Grosman et al. 2008). Возможность определения объема трехмерной модели неразрывно связана как с определением центра масс, так и с возможными последующими исследовательскими процедурами. Особые перспективы перед исследователями открываются в реконструкции изначальной массы органических артефактов, которая изменилась в результате постдипозиционных процессов.

В качестве примера мы провели метрические измерения (ширина и толщина) и определение объема трехмерных моделей бифасиальных изделий из среднепалеолитического комплекса Чагырской пещеры. На основе значений ширины и толщины был вычислен индекс массивности орудий. Результаты измерений представлены на рис. 6. Как мы

видим, по индексу массивности и по объему обушковые бифасиальные ножи типа *Keilmesser* значительно отличаются от остальных бифасиальных орудий: наблюдается больший объем и меньшая массивность изделий. Интересным наблюдением является тот факт, что для ножей типа *Keilmesser* свойствен индекс массивности в узком промежутке – от 1 до 2,5. Таким образом, на основе анализа объема мы получили новые данные, которые свидетельствуют, с одной стороны, о стандартизации обушковых ножей типа *Keilmesser* в рамках индустрии Чагырской пещеры. С другой стороны, новые данные свидетельствуют о различных технологических подходах в рамках плоско-выпуклой технологии, использующихся для изготовления бифасиальных орудий различной типологической принадлежности.

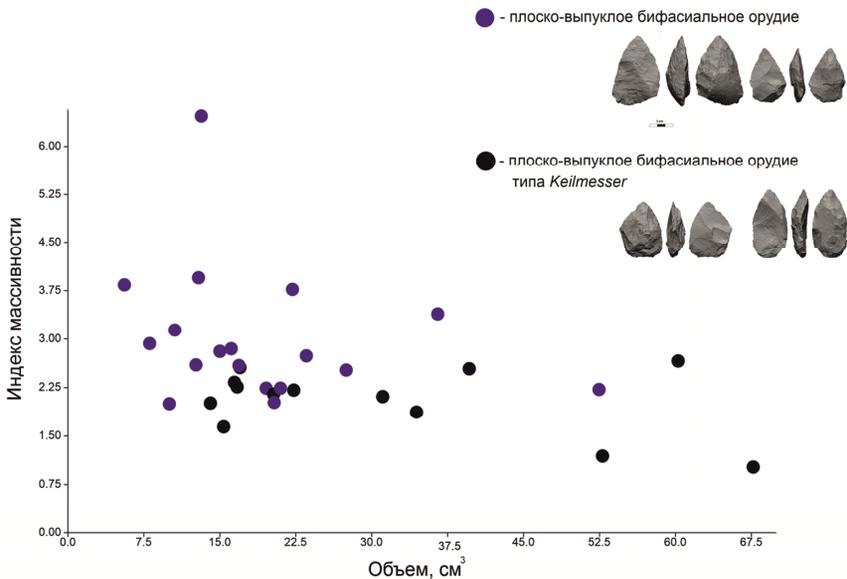


Рис. 6. График индекса массивности бифасиальных изделий из среднепалеолитического комплекса Чагырской пещеры

Подсчет объема моделей артефактов возможен в программах Geomagic Wrap, 3D Artifact, Geomagic Design X.

*Прорисовка негативов сколов на каменных артефактах.* Новой возможностью визуализации и анализа каменных орудий является возможность прорисовки границ негативов / фасеток ретуши на каменных орудиях. Впервые данный алгоритм был предложен исследовательским коллективом под руководством Л. Гросман (Grosman et al. 2014) и впоследствии успешно применен при определении целей одного технического приема переоформления лезвий на стоянке Нешер-Рамла (Левант) (Zaidner, Grosman 2015). Все технологические операции описанных изделий осуществлялись в программном обеспечении 3D Artifact.

Новая программа 3D Tracer с похожими функциями была разработана российскими исследователями и применена для визуализации результатов анализа последовательности сколов бифасиального орудия из комплекса Чагырской пещеры (Алтай), в результате которого была доказана культуромаркирующая функция плоско-выпуклой технологии в среднем палеолите региона (Зоткина, Ковалев, Шалагина 2018; Kolobova et al. 2019a).

На рисунке представлено плоско-выпуклое бифасиальное орудие из комплекса Чагырской пещеры с прорисованными негативами сколов фасонажа и ретуши (рис. 7).

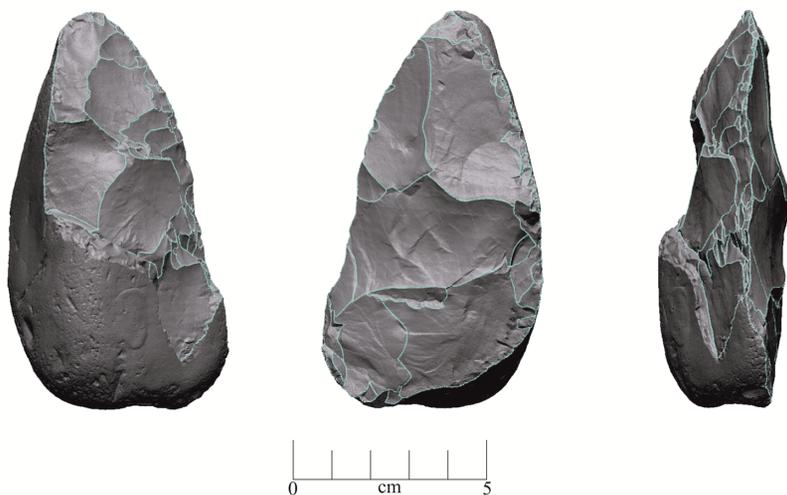


Рис. 7. Бифасиальное орудие из комплекса Чагырской пещеры с прорисованными негативами сколов

*Применение трехмерного моделирования с целью ремонта.* Значительное внимание исследователей уделяется возможностям методов 3D моделирования для реконструкции процессов расщепления в рамках аппликативного метода. В настоящее время с помощью трехмерного моделирования возможно визуализировать процессы расщепления в археологических или экспериментальных комплексах на основе имеющихся склеек (Sumner, Riddle 2008; Lang 2013; Weiss 2015; Delpiano, Peresani, Pastoors 2017). Успешное практическое воплощение автоматического ремонта осложняется необходимостью создания большого количества масштабированных моделей, что будет возможно в недалеком будущем.

*Геометрико-морфометрический анализ.* В качестве самостоятельного инструмента исследования различных категорий артефактов, антропологических, палеонтологических остатков выступает геометрико-

морфометрический анализ, с помощью которого возможен анализ выборки предметов во всем многообразии проявления их формы. Исследователи применяют геометрико-морфометрический анализ для исследования морфологии и классификации бифасиальных изделий, важных антропологических и палеонтологических находок (Jöris 2002; Freidline et al. 2012; Archer et al. 2015; Herzlinger, Goren-Inbar, Grosman 2017; Herzlinger, Grosman 2018; Kolobova et al. 2020). В этой статье мы намеренно не детализируем исследовательские процедуры метода, поскольку они представлены в отдельной публикации (Шалагина и др. 2020). Дальнейшее развитие этого метода предполагает возможность достаточно точного установления размеров каменных артефактов на основе фрагментарных данных (Archer et al. 2018) и установление тенденций изменения формы костей в результате естественного роста (Gunz, Bulygina 2012).

### Дискуссия и выводы

В результате обзора широких возможностей применения трехмерного моделирования в процессе анализа различных археологических артефактов необходимо сделать вывод о высокой перспективности данного метода как в составе комплексных исследований, так и в качестве самостоятельного инструмента, способного предоставить недоступную в рамках применения стандартных методик информацию. Получение масштабированных моделей, возможность их полноразмерной печати стирает грань между моделью и артефактом (Garstki 2017). Экономически не затратная возможность изучения и полноценного манипулирования моделью делает данный метод незаменимым и зачастую единственно возможным.

В обзор не были включены интереснейшие данные об изучении других категорий артефактов каменного века. Так, костяные орудия могут определяться в качестве ритуальных в силу контекста обнаружения, продолжительности исследования и функции (Klein, Belfer-Cohen, Grosman 2017). Исследование следов порезов на древних костях, их причин возникновения, отличия преднамеренных порезов от следов вытаптывания и активности хищников в настоящее время проводится с активным применением трехмерного моделирования (микрофотограмметрия и трехмерное сканирование) на стыке с трасологией и математической статистикой (Arriaza et al. 2017; Val et al. 2017; Courtenay et al. 2019).

Анализ трехмерных моделей археологических артефактов позволяет археологам оперировать принципиально новыми, ранее не доступными инструментами исследований: трехмерный геометрико-морфометрический анализ, расчет объема артефактов, центра гравитации, прошивка контуров негативов, построение карты высот.

Возможность обеспечения доступа к трехмерным моделям артефактов делает возможным верифицирование получаемых в процессе исследования данных, что приближает археологические исследования к естественным наукам.

### Благодарности

*Трехмерное сканирование археологических артефактов проведено в рамках проекта научно-исследовательской работы Института археологии и этнографии Сибирского отделения Российской Академии наук № 0264-2019-0009 «Цифровые технологии в реконструкции стратегий жизнеобеспечения древнего населения Евразии». Исследование костяных орудий выполнено в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-09-400-70 «Охотничьи стратегии неандертальцев Северной Азии».*

### Литература

- Вавулин М.В., Зайцева О.В., Пушкарев А.А. Методика и практика 3D сканирования разнотипных археологических артефактов // Сибирские исторические исследования. 2014. № 4. С. 21–37.
- Вавулин М.В., Зайцева О.В., Пушкарев А.А. Трехмерное сканирование и моделирование корабельных деталей коча // Виртуальная археология (эффективность методов): материалы Второй междунар. конф. Государственный Эрмитаж. СПб., 2015. С. 234–239.
- Деревянко А.П., Маркин С.В., Колобова К.А., Чабай В.П., Рудая Н.А., Виола Б., Бужилова А.П., Медникова М.Б., Васильев С.К., Зыкин В.С., Зыкина В.С., Зажигин В.С., Вольвах А.О., Робертс Р.Г., Якобс З., Бо Ли. Междисциплинарные исследования Чагырской пещеры – стоянки среднего палеолита Алтая. Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2018. DOI: 10.17746/7803-0288-9.2018
- Зоткина Л.В., Ковалев В.С., Шалагина А.В. Возможности и перспективы применения трехмерной визуализации как инструмента анализа в археологии // Научная визуализация. 2018. Т. 10, № 5. С. 172–190. URL: <http://sv-journal.org/2018-5/11/?lang=ru>
- Колобова К.А. Приемы оформления каменных орудий в палеолитических комплексах Горного Алтая. Новосибирск: ИАЭТ СО РАН, 2006.
- Колобова К.А., Маркин С.В., Чабай В.П. Костяные ретушеры в среднепалеолитических комплексах Чагырской пещеры // Теория и практика археологических исследований. 2016. № 4 (16). С. 35–39.
- 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. № 27 (3). С. 102–112. doi: 10.14258/tpai(2019)3(27).-07
- Чжоу Ч. Применение технологий трехмерной реконструкции в палеолитической археологии // *Universum Humanitarium*. 2017. № 1. С. 120–143.
- 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.
- Abouaf J. The Florentine Pietà: Can Visualization Solve the 450-Year-Old Mystery? // *IEEE Computer Graphics and Applications*. 1999. Vol. 19 (1). P. 6–10. DOI: 10.1109/38.736462
- Ahmed N., Carter M., Ferris N. Sustainable archaeology through progressive assembly 3D digitization // *World Archaeology*. 2014. Vol. 46 (1). P. 137–154.

- Archer W., Gunz P., van Niekerk K.L., Henshilwood C.S., McPherron S.P. Diachronic change within the Still Bay at Blombos Cave, South Africa // *PLoS One*. 2015. Vol. 10 (7). DOI: 10.1371/journal.pone.0132428
- Archer W., Pop C.M., Rezei Z., Schlager S., Lin S.C., Weiss M., Dogandžić T., Desta D., McPherron S.P. A geometric morphometric relationship predicts stone flake shape and size variability // *Journal of Anthropological and Archaeological Sciences*. 2018. Vol. 10, is. 8. P. 1991–2003. DOI: 10.1007/s12520-017-0517-2
- Arriaza M.C., Yravedra J., Domínguez-Rodrigo M., Mate-González M.A., García Vargas E., Palomeque-González J.F., Aramendi J., González-Aguilera D., Baquedano E. On applications of microphotogrammetry and geometric morphometrics to studies of tooth mark morphology: the modern Olduvai carnivore site (Tanzania) // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2017. Vol. 488. P. 103–112. DOI: 10.1016/j.palaeo.2017.01.036
- Beraldin J.A., Blais F., Cournoyer L., Rioux M., El-Hakim S.H., Rodella R., Bernier F., Harrison N. Digital 3D Imaging System for Rapid Response on Remote Sites // *Proceedings of the 2nd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*. 1999. Ottawa, Canada. P. 34–43.
- Bretzke K., Conard N.J. Evaluating morphological variability in lithic assemblages using 3D models of stone artifacts // *The Journal of Archaeological Science*. 2012. Vol. 39. P. 3741–3749. DOI: 10.1016/j.jas.2012.06.039
- Caricola I., Zupancich A., Moscone D., Mutri G., Falcucci A., Duches R., Peresani M., Cristiani E. An integrated method for understanding the function of macro-lithic tools. Use wear, 3D and spatial analyses of an Early Upper Palaeolithic assemblage from North Eastern Italy // *PLoS One*. 2018. Vol. 13 (12): e0207773. DOI: 10.1371/journal.pone.0207773
- Cassen S., Lescop L., Grimaud V., Robin G. Complementarity of acquisition techniques for the documentation of Neolithic engravings: lasergrammetric and photographic recording in Gavrinis passage tomb (Brittany, France) // *Journal of Archaeological Science*. 2014. Vol. 45. P. 126–140.
- 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. DOI: 10.1038/s41586-019-1139-x
- Clarkson C., Hiscock P. Tapping into the past: Exploring Palaeolithic Retouching through experimentation // *Lithic Technology*. 2008. Vol. 33 (1). P. 5–16.
- Counts D.B., Averett E.W., Garstki K. A fragmented past: (re)constructing antiquity through 3D artefact modelling and customised structured light scanning at Athienou-Malloura, Cyprus // *Antiquity*. 2016. № 90 (349). P. 206–218. DOI: 10.15184/aqy.2015.181
- Courtenay L.A., Yravedra J., Mate-González M.A., Aramendi J., González-Aguilera D. 3D analysis of cut marks using a new geometric morphometric methodological approach // *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2019. Vol. 11. P. 651–665. DOI: 10.1007/s12520-017-0554-x
- Delpiano D., Peresani M., Pastoors A. The contribution of 3D visual technology to the study of Palaeolithic knapped stones based on refitting // *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2017. Vol. 4. P. 28–38. DOI: 10.1016/j.daach.2017.02.002
- Derevianko A.P., Markin S.V., Kulik N.A., Kolobova K.A. Lithic raw material exploitation in the Sibiryachikha facies, the Middle Paleolithic of Altai // *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*. 2015. № 43 (3). P. 3–16.
- De Reu J., Plets G., Verhoevan G., De Smedt P., Bats M., Cherretté B., De Maeyer W., Deconynck J., Herremans D., Laloo P., Van Meirvenne M., De Clercq W. Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage // *Journal of Archaeological Science*. 2013. Vol. 40. P. 1108–1121.
- Evgenikou V., Georgopoulos A. Investigating 3D reconstruction methods for small artifacts // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XL-5/W4. 2015. P. 101–108. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-101-2015

- 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. DOI: 10.1016/j.jhevol.2011.11.005
- Garstki K. Virtual Representation: the Production of 3D Digital Artifacts // *Journal of Archaeological Method and Theory*. 2017. Vol. 24. P. 726–750. DOI: 10.1007/s10816-016-9285-z
- Georgopoulos A. Data Acquisition for the Geometric Documentation of Cultural Heritage // *Mixed Reality and Gamification for Cultural Heritage*. 2017. P. 29–73.
- Grosman L., Karasik A., Harush O., Smilansky U. Archaeology in Three Dimensions: Computer-Based Methods in Archaeological Research // *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies*. 2014. Vol 2. P. 48–64. DOI: 10.5325/jeasmedarcherstu.2.1.0048
- Grosman L., Ovadia A., Bogdanovsky A. Neolithic Masks in a Digital World // *Face to Face. The Oldest Masks in the World*. Jerusalem: The Israel Museum, 2014. P. 54–59.
- Grosman L., Smikt O., Smilansky U. On the application of 3-D scanning technology for the documentation and typology of lithic artifacts // *The Journal of Archaeological Science*. 2008. Vol. 35 (12). P. 3101–3110. DOI: 10.1016/j.jas.2008.06.011
- Gunz P., Bulygina E. The Mousterian child from Teshik-Tash is a Neanderthal: A geometric morphometric study of the frontal bone // *American Journal of Physical Anthropology*. 2012. Vol. 149 (3). P. 365–379. DOI: 10.1002/ajpa.22133
- Heath S. Closing gaps with low-cost 3D // *Visions of substance: 3D imaging in Mediterranean archaeology* / eds. by B. Olson, W. Caraher. Grand Forks: The Digital Press at the University of North Dakota, 2015. P. 53–62.
- Herzlinger G., Goren-Inbar N., Grosman L. A new method for 3D geometric morphometric shape analysis: The case study of handaxe knapping skill // *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2017. Vol. 14. P. 163–173. DOI: 10.1016/j.jasrep.2017.05.013
- Herzlinger G., Grosman L. AGMT3-D: A software for 3-D landmarks-based geometric morphometric shape analysis of archaeological artifacts // *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13 (11): e0207890. DOI: 10.1371/journal.pone.0207890
- Jöris O. Out of the Cold. On Late Neandertal Population Dynamics in Central Europe // *Notae Praehistoricae*. 2002. Vol. 22. P. 33–45.
- Karasik A., Smilansky U. 3D scanning technology as a standard archaeological tool for pottery analysis: practice and theory // *The Journal of Archaeological Science*. 2008. Vol. 35. P. 1148–1168. DOI: 10.1016/j.jas.2007.08.008
- Karasik A., Smilansky U. Computerized morphological classification of ceramics // *Journal of Archaeological Science*. 2011. Vol. 38, is. 10. P. 2644–2657. DOI: 10.1016/j.jas.2011.05.023
- Klein N., Belfer-Cohen A., Grosman L. Bone tools as the paraphernalia of ritual activities: a case study from Hilazon Tachtit cave // *Eurasian Prehistory*. 2017. № 13 (1–2). P. 91–104.
- Kolobova K., Shalagina A., Chabai V., Markin S., Krivoshapkin A. Signification des technologies bifaciales au Paléolithique moyen des montagnes de l'Altai. // *L'antropologie*. 2019a. Vol. 123, is. 2. P. 276–288. DOI: 10.1016/j.anthro.2019.06.004
- 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 & Anthropology of Eurasia*. 2019b. Vol. 47, № 4. P. 66–76. DOI: 10.17746/1563-0110.2019.47.4.066-076
- Kolobova K.A., Roberts R.G., Chabai V.P., Jacobs Z., Krajcarz M.T., Shalagina A.V., Krivoshapkin A.I., Li B., Uthmeier T., Markin S.V., Morley M.W., O'Gorman K., Rudaya N.A., Talamo S., Viola B., Derevianko A.P. Archaeological evidence for two separate dispersals of Neanderthals into southern Siberia // *PNAS*. 2020. Vol. 117 (6). P. 2879–2885. DOI: 10.1073/pnas.1918047117
- Lang N. The stone age meets the digital age: exploring the application of digital, three-dimensional technologies for the study of lithic artifacts // *Berkeley Undergraduate Journal*. 2013. Vol. 26, is. 3. P. 129–143.

- Levoy M., Pulli K., Curless B., Rusinkiewicz S., Koller D., Pereira L., Gintzton M., Anderson S., Davis J., Ginsberg J., Shade J. The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues // Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM Press, Addison-Wesley Publishing Co., 2000. P. 131–144.
- Mathys A., Brecko J., Di Modica K., Abrams G., Bonjean D., Semal P. Agora 3D. Low cost 3D imaging: a first look for field archaeology // *Natae Praehistoricae*. 2013. № 33. P. 33–42.
- 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. P. 19–24.
- Morris C., Peatfield A., O'Neill B. 'Figures in 3D': Digital Perspectives on Cretan Bronze Age Figurines // *Open Archaeology*. 2018. № 4. P. 50–61. DOI: 10.1515/opar-2018-0003
- Pastors A., Weniger G.-C. Close range sensing for generating 3D objects in prehistoric archaeology // Proceedings of the ISPRS WG VII/5 Workshop, 18-19.11.2011 / eds. by V. Lenz-Wiedemann, G. Bareth. Cologne: Köln. 2011. P. 103–106.
- Porter S., Roussel M., Soressi M. A Comparison of Châtelperronian and Protoaurignacian Core Technology Using Data Derived from 3D Models // *Journal of computer applications in archaeology*. 2016. № 2 (1). P. 41–55. DOI: <https://doi.org/10.5334/jcaa.17>
- Puhar E.G., Eric M., Kavkler K., Cramer A., Celec K., Korat L., Jaclik A., Solina F. Comparison and Deformation Analysis of five 3D models of the Paleolithic wooden point from the Ljublanica River // 2018 IEEE International Workshop on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (MetroArchaeo 2018). Proceedings. 2018. Cassino, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. P. 444–449.
- Remondino F., El-Hakim S. Image-based 3D modelling: a review // *The Photogrammetric Record*. 2006. № 21 (115). P. 269–291.
- Remondino F. Photogrammetry – basic theory // 3D recording and modelling in archaeology and cultural heritage: theory and best practices / eds. by F. Remondi, S. Campana. Oxford: Archaeopress, 2014. P. 65–73.
- Richardson E., Grosman L., Smilansky U., Werman M. Extracting Scar and Ridge Features from 3D-scanned Lithic Artifacts. Archaeology in the Digital Era // Papers from the 40th Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA) / eds. by G. Earl, T. Sly, A. Chrysanthi, P. Murrieta-Flores, C. Papadopoulos, I. Romanowska, D. Wheatley. Southampton: Amsterdam University Press, 2013. P. 83–92.
- Riel-Salvatore J., Bae M., Clark G.A., Lindly J.M., McCartney P., Razdan A. The past meets the future: 3D modeling technology and lithic analysis at Wadi al-Hasa locality 623X // *Journal of Human Evolution*. 2004. Vol. 42 (3). P. A29.
- Sumner A.T., Riddle A. A virtual Paleolithic: assays in photogrammetric three-dimensional artifact modelling // *PaleoAnthropology*. 2008. P. 158–169.
- Val A., Costamagno S., Discamps E., Chong S., Claud E., Deschamps M., Mourre V., Soulier M.C., Thiébaud C. Testing the influence of stone tool type on microscopic morphology of cut-marks: experimental approach and application to the archaeological record with a case study from the middle Palaeolithic site of Noisetier cave (Fréchet-Aure, Hautes-Pyrénées, France) // *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2017. Vol. 11. P. 17–28.
- Valletta F., Smilanski U., Goring-morris N.A., Grosman L. On measuring the mean cutting-edge angle of lithic tools based on 3-D models - a case study from the Southern Levantine Epipaleolithic // *Archaeological Anthropological Sciences*. 2020. Vol. 12. DOI: 10.1007/s12520-019-00954-w
- Weiss M. Stone tool analysis and context of a new late Middle Paleolithic site in western central Europe – Pouch-Terrassenpfeiler, Ldkr. Anhalt-Bitterfeld, Germany // *Quartar*. 2015. Vol. 62. P. 23–62.

- Zaidner Y., Grosman L. Middle Paleolithic sidescrapers were reshaped or recycled? A view from Neshet Ramla, Israel // *Quaternary International*. 2015. № 361. P. 178–187. DOI: 10.1016/j.quaint.2014.11.037
- Zotkina L.V., Kovalev V.S. Lithic or Metal Tools: Techno-Traceological and 3D Analysis of Rock Art // *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2019. Vol. 13. DOI: 10.1016/j.daach.2019.e00099

Статья поступила в редакцию журнала 6 апреля 2020 г.

*Kolobova Ksenia A., Shalagina Alena V., Chistyakov Pavel V., Bocharova Ekaterina N., and Krivoshapkin Andrey I.*

### THREE-DIMENSIONAL MODELLING APPLICATION FOR STUDYING STONE AGE ASSEMBLAGES

DOI: 10.17223/2312461X/30/12

**Abstract.** Digital technology advancements have been widely applied in science, particularly in archaeology. The article discusses new possibilities and prospects for three-dimensional modelling using structured light scanners in order to obtain new, previously inaccessible data. As a scientific method, three-dimensional scanning has certain advantages over photogrammetry and computer tomography. It allows obtaining scale 3D models that fully match actual artifacts, by employing relatively inexpensive equipment. This, in turn, allows for accurate measurement and non-invasive model manipulation, which takes archaeological research to a new level where any data obtained and experiments carried out can be verified. In recent years, research procedures previously unavailable to archaeologists have been developed or improved, including three-dimensional geometric morphometric analysis, calculation of artifact's volume/center of gravity, and drawing contours of negatives. The article presents these new possibilities through the example of three-dimensional models of artifacts from the Middle Paleolithic assemblages of the Chagyrskaya Cave (Altai Mountains).

**Keywords:** three-dimensional modelling, structured light scanners, lithic tools, bone tools, machine measurements, calculating center of mass, geometric morphometric analysis

### References

- Vavulin M.V., Zaitseva O.V., Pushkarev A.A. Metodika i praktika 3D skanirovaniia raznotipnykh arkhologicheskikh artefaktov [3D scanning techniques and practices used for different types of archaeological artifacts], *Sibirskie istoricheskie issledovaniia*, 2014, no. 4, pp. 21–37.
- Vavulin M.V., Zaitseva O.V., Pushkarev A.A. Trekhmernoe skanirovanie i modelirovanie korabel'nykh detalei kocha [3D scanning and modelling of ship parts]. In: *Virtual'naiia arkhologiiia (effektivnost' metodov). Materialy Vtoroi Mezhdunarodnoi konferentsii* [Virtual archaeology and effectiveness of methods. 2<sup>nd</sup> International Conference. Proceedings]. St. Petersburg, 2015, pp. 234–239.
- Derevianko A.P., Markin S.V., Kolobova K.A., Chabai V.P., Rudaia N.A., Viola B., Buzhilova A.P., Mednikova M.B., Vasil'ev S.K., Zykin V.S., Zykina V.S., Zazhigin V.S., Vol'vakh A.O., Roberts R.G., Iakobs Z., Bo Li. *Mezhdistsiplinarnye issledovaniia Chagyrskoi peshchery – stoiarki srednego paleolita Altaia* [International research on the Chagyrskaya Cave, a Middle Paleolithic site]. Novosibirsk: Izd-vo IAET SO RAN, 2018. DOI: 10.17746/7803-0288-9.2018
- Zotkina L.V., Kovalev V.S., Shalagina A.V. Vozmozhnosti i perspektivy primeniia trekhmernoi vizualizatsii kak instrumenta analiza v arkhologii [The potential of and prospects for applying the 3D visualization technique in archaeology], *Nauchnaia*

- vizualizatsiia*, 2018, no. 5, Vol. 10, pp. 172–190. Available at: <http://sv-journal.org/2018-5/11/?lang=ru>
- Kolobova K.A. *Priemy oformleniia kamennykh orudii v paleoliticheskikh kompleksakh Gornogo Altaia* [Stone tools at Paleolithic sites in the region of Gornyy Altai, Russia]. Novosibirsk: IAET SO RAN, 2006.
- Kolobova K.A., Markin S.V., Chabai V.P. Kostianye retushery v srednepaleoliticheskikh kompleksakh Chagyrskoi peshchery [Bone retouching and the Middle Paleolithic complexes of the Chagyrskaya Cave], *Teoriia i praktika arkheologicheskikh issledovaniï*, 2016, no. 4(16), pp. 35–39.
- Chistiakov P.V., Kovalev V.S., Kolobova K.A., Shalagina A.V., Krivoschapkin. A.I. 3D modelirovanie arkheologicheskikh artefaktov pri pomoshchi skanerov strukturirovannogo podsveta [Structured light scanners and 3D modelling of archaeological artifacts], *Teoriia i praktika arkheologicheskikh issledovaniï*, 2019, no. 27(3), pp. 102–112. [https://doi.org/10.14258/tpai\(2019\)3\(27\).-07](https://doi.org/10.14258/tpai(2019)3(27).-07)
- Zhou Ch. Primenenie tekhnologii trekhmernoï rekonstruktsii v paleoliticheskoi areologii [3D reconstruction in Paleolithic archaeology], *Universum Humanitarium*, 2017, no. 1, pp. 120–143.
- Shalagina A.V., Kolobova K.A., Chistiakov P.V., Krivoschapkin A.I. 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*, 2020, no. 1, pp. 343–358.
- Abouaf J. The Florentine Pietà: Can visualization solve the 450-year-old mystery?, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1999, Vol. 19 (1), pp. 6–10. DOI:10.1109/38.736462
- Ahmed N., Carter M., Ferris N. Sustainable archaeology through progressive assembly 3D digitization, *World Archaeology*, 2014, Vol. 46 (1), pp. 137–154.
- Archer W., Gunz P., van Niekerk K.L., Henshilwood C.S., McPherron S. P. Diachronic change within the Still Bay at Blombos Cave, South Africa, *PLoS One*, 2015, Vol. 10(7). DOI 10.1371/journal.pone.0132428
- Archer W., Pop C.M., Rezei Z., Schlager S., Lin S.C., Weiss M., Dogandžić T., Desta D., McPherron S.P. A geometric morphometric relationship predicts stone flake shape and size variability, *Journal of Anthropological and Archaeological Sciences*, 2018, Vol. 10, Iss. 8, pp. 1991–2003. DOI 10.1007/s12520-017-0517-2.
- Arriaza M.C., Yravedra J., Domínguez-Rodrigo M., Mate-González M.A., García Vargas E., Palomeque-González J.F., Aramendi J., GonzálezAguilera D., Baquedano E. On applications of microphotogrammetry and geometric morphometrics to studies of tooth mark morphology: the modern Olduvai carnivore site (Tanzania), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2017, Vol. 488, pp. 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.01.036>
- Beraldin J.A., Blais F., Cournoyer L., Rioux M., El-Hakim S.H., Rodella R., Bernier F., Harrison N. Digital 3D Imaging System for Rapid Response on Remote Sites. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*. 1999. Ottawa, Canada, pp. 34–43.
- Bretzke K., Conard N.J. Evaluating morphological variability in lithic assemblages using 3D models of stone artifacts, *The Journal of Archaeological Science*, 2012, Vol. 39, pp. 3741–3749. DOI: 10.1016/j.jas.2012.06.039
- Caricola I., Zupancich A., Moscone D., Mutri G., Falcucci A., Duches R., Peresani M., Cristiani E. An integrated method for understanding the function of macro-lithic tools. Use wear, 3D and spatial analyses of an Early Upper Palaeolithic assemblage from North Eastern Italy, *PLoS One*, 2018, Vol. 13(12): e0207773. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207773>
- Cassen S., Lescop L., Grimaud V. Robin G. Complementarity of acquisition techniques for the documentation of Neolithic engravings: laser-grammetric and photographic recording

- in Gavrinis passage tomb (Brittany, France), *Journal of Archaeological Science*, 2014, Vol. 45, pp. 126–140.
- 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, pp. 409–412. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1139-x>
- Clarkson C., Hiscock P. Tapping into the past: Exploring Palaeolithic Retouching through experimentation, *Lithic Technology*, 2008, Vol. 33(1), pp. 5–16.
- Counts D.B., Averett E.W., Garstki K. A fragmented past: (re)constructing antiquity through 3D artefact modelling and customised structured light scanning at Athienou-Malloura, Cyprus, *Antiquity*, 2016, no. 90(349), pp. 206–218. <https://doi.org/10.15184/aqy.2015.181>
- Courtenay L.A., Yravedra J., Mate-González M.A., Aramendi J., González-Aguilera D. 3D analysis of cut marks using a new geometric morphometric methodological approach, *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2019, Vol. 11, pp. 651–665. <https://doi.org/10.1007/s12520-017-0554-x>
- Delpiano D., Peresani M., Pastoors A. The contribution of 3D visual technology to the study of Palaeolithic knapped stones based on refitting, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2017, Vol. 4, pp. 28–38. DOI:10.1016/j.daach.2017.02.002
- Derevianko A.P., Markin S.V., Kulik N.A., Kolobova K.A. Lithic raw material exploitation in the Sibiryachikha facies, the Middle Paleolithic of Altai, *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*, 2015, no. 43(3), pp. 3–16.
- De Reu J., Plets G., Verhoevan G., De Smedt P., Bats M., Cherretté B., De Maeyer W., Deconynck J., Herremans D., Laloo P., Van Meirvenne M., De Clercq W. Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage, *Journal of Archaeological Science*, 2013, Vol. 40, pp. 1108–1121.
- Evgenikou V., Georgopoulos A. Investigating 3D reconstruction methods for small artifacts, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XL-5/W4*. 2015, pp. 101–108, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-101-2015>
- 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, pp. 225–241. DOI: 10.1016/j.jhevol.2011.11.005
- Garstki K. Virtual Representation: the Production of 3D Digital Artifacts, *Journal of Archaeological Method and Theory*, 2017, Vol. 24, pp. 726–750. DOI 10.1007/s10816-016-9285-z
- Georgopoulos A. Data acquisition for the geometric documentation of cultural heritage, *Mixed Reality and Gamification for Cultural Heritage*, 2017, pp. 29–73.
- Grosman L., Karasik A., Harush O., Smilansky U. Archaeology in three dimensions: Computer-based methods in archaeological research, *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies*, 2014, Vol. 2, pp. 48–64. DOI: 10.5325/jeasmedar-cherstu.2.1.0048
- Grosman L., Ovadia A., Bogdanovsky A. Neolithic masks in a digital world. In: *Face to Face. The Oldest Masks in the World*. Jerusalem: The Israel Museum, 2014, pp. 54–59.
- Grosman L., Smikt O., Smilansky U. On the application of 3-D scanning technology for the documentation and typology of lithic artifacts, *The Journal of Archaeological Science*, 2008, Vol. 35(12), pp. 3101–3110. DOI: 10.1016/j.jas.2008.06.011
- Gunz P., Bulygina E. The Mousterian child from Teshik-Tash is a Neanderthal: A geometric morphometric study of the frontal bone, *American Journal of Physical Anthropology*, 2012, Vol. 149(3), pp. 365–379. DOI:10.1002/ajpa.22133
- Heath S. Closing gaps with low-cost 3D. In: *Visions of substance: 3D imaging in Mediterranean archaeology*. Editors Olson B., Caraher W., Grand Forks: The Digital Press at the University of North Dakota, 2015, pp. 53–62.

- Herzlinger G., Goren-Inbar N., Grosman L. A new method for 3D geometric morphometric shape analysis: The case study of handaxe knapping skill, *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2017, Vol. 14, pp. 163–173. DOI: 10.1016/j.jasrep.2017.05.013
- Herzlinger G., Grosman L. AGMT3-D: A software for 3-D landmarks-based geometric morphometric shape analysis of archaeological artifacts, *PLoS ONE*, 2018, vol. 13(11): e0207890. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207890>
- Jöris O. Out of the Cold. On Late Neandertal Population Dynamics in Central Europe, *Notae Praehistoricae*, 2002, Vol. 22, pp. 33–45.
- Karasik A., Smilansky U. 3D scanning technology as a standard archaeological tool for pottery analysis: practice and theory, *The Journal of Archaeological Science*, 2008, Vol. 35, pp. 1148–1168. DOI: 10.1016/j.jas.2007.08.008
- Karasik A., Smilansky U. Computerized morphological classification of ceramics, *Journal of Archaeological Science*, 2011, Vol. 38, iss. 10, pp. 2644–2657. DOI: 10.1016/j.jas.2011.05.023
- Klein N., Belfer-Cohen A., Grosman L. Bone tools as the paraphernalia of ritual activities: A case study from Hilazon Tachtit cave, *Eurasian Prehistory*, 2017, no. 13(1–2), pp. 91–104.
- Kolobova K., Shalagina A., Chabai V., Markin S., Krivoschapkin A. Signification des technologies bifaciales au Paléolithique moyen des montagnes de l'Altai. *L'anthropologie*, 2019a, Vol. 123, iss. 2, pp. 276–288. <https://doi.org/10.1016/j.anthro.2019.06.004>
- 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 & Anthropology of Eurasia*, 2019b, Vol 47, No 4, pp. 66–76 <https://doi.org/10.17746/1563-0110.2019.47.4.066-076>
- Kolobova K.A., Roberts R.G., Chabai V.P., Jacobs Z., Krajcarz M.T., Shalagina A.V., Krivoschapkin A.I., Li B., Uthmeier T., Markin S.V., Morley M.W., O'Gorman K., Rudaya N.A., Talamo S., Viola B., Derevianko A.P. Archaeological evidence for two separate dispersals of Neanderthals into southern Siberia, *PNAS*, 2020, Vol. 117(6), pp. 2879–2885. <https://doi.org/10.1073/pnas.1918047117>
- Lang N. The stone age meets the digital age: exploring the application of digital, three-dimensional technologies for the study of lithic artifacts, *Berkeley Undergraduate Journal*, 2013, Vol. 26, Iss. 3, pp. 129–143.
- Levoy M., Pulli K., Curless B., Rusinkiewicz S., Koller D., Pereira L., Ginzton M., Anderson S., Davis J., Ginsberg J., Shade J. The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues. In: *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM Press, Addison-Wesley Publishing Co., 2000, pp. 131–144.
- Mathys A., Brecko J., Di Modica K., Abrams G., Bonjean D., Semal P. Agora 3D. Low cost 3D imaging: a first look for field archaeology, *Notae Praehistoricae*, 2013, no. 33, pp. 33–42.
- 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, pp. 19–24.
- Morris C., Peatfield A., O'Neill B. 'Figures in 3D': Digital perspectives on Cretan Bronze Age figurines, *Open Archaeology*, 2018, no. 4, pp. 50–61. <https://doi.org/10.1515/opar-2018-0003>
- Pastors A., Weniger G-C. Close range sensing for generating 3D objects in prehistoric archaeology. In: *Proceedings of the ISPRS WG VII/5 Workshop*, 18-19.11.2011. Editors Lenz-Wiedemann V. Bareth G. Cologne: Köln, 2011, pp. 103–106.
- Porter S., Roussel M., Soressi M. A Comparison of Châtelperronian and Protoaurignacian core technology using data derived from 3D models, *Journal of computer applications in archaeology*, 2016, no. 2(1), pp. 41–55. DOI: <https://doi.org/10.5334/jcaa.17>

- Puhar E.G., Eric M., Kavkler K., Cramer A., Celec K., Korat L., Jaclic A., Solina F. Comparison and deformation analysis of five 3D models of the Paleolithic wooden point from the Ljublanica River. In: *2018 IEEE International Workshop on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage* (MetroArcheo 2018). Proceedings. 2018. Cassino, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., pp. 444–449.
- Remondino F., El-Hakim S. Image-based 3D modelling: A review, *The Photogrammetric Record*, 2006, no. 21(115), pp. 269–291.
- Remondino F. Photogrammetry – basic theory. In: *3D recording and modelling in archaeology and cultural heritage: theory and best practices*. Editors Remondi F., Campana S. Oxford: Archaeopress, 2014, pp. 65–73.
- Richardson E., Grosman L., Smilansky U., Werman M. Extracting scar and ridge features from 3D-scanned lithic artifacts. Archaeology in the digital era. In: *Papers from the 40th Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*. Editors Earl G., Sly T., Chrysanthi A., Murrieta-Flores P., Papadopoulos C., Romanowska I., Wheatley D. Southampton, Amsterdam University Press, 2013, pp. 83–92.
- Riel-Salvatore J., Bae M., Clark G.A., Lindly J.M., McCartney P., Razdan A. The past meets the future: 3D modeling technology and lithic analysis at Wadi al-Hasa locality 623X, *Journal of Human Evolution*, 2004, Vol. 42(3), pp. A29.
- Stamatopoulos M.I., Anagnostopoulos C. *3D digital reassembling of archaeological ceramic pottery fragments based on their thickness profile*. 2016. CoRR abs/1601.05824 URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1601/1601.05824.pdf>
- Sumner A.T., Riddle A. A virtual Paleolithic: assays in photogrammetric three-dimensional artifact modelling, *PaleoAnthropology*, 2008, pp. 158–169.
- Val A., Costamagno S., Discamps E., Chong S., Claud E., Deschamps M., Moure V., Soulier M.C., Thiébaud C. Testing the influence of stone tool type on microscopic morphology of cut-marks: Experimental approach and application to the archaeological record with a case study from the middle Palaeolithic site of Noisetier cave (Fréchet-Aure, Hautes-Pyrénées, France), *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2017, Vol. 11, pp. 17–28.
- Valletta, F., Smilanski, U., Goring-morris, N.A., Grosman, L., 2020. On measuring the mean cutting-edge angle of lithic tools based on 3-D models – a case study from the Southern Levantine Epipaleolithic, *Archaeological Anthropological Sciences*, 2020, Vol. 12, <https://doi.org/10.1007/s12520-019-00954-w>
- Weiss M. Stone tool analysis and context of a new late Middle Paleolithic site in western central Europe – Pouch-Terrassenpfeiler, Ldkr. Anhalt-Bitterfeld, Germany, *Quartar*, 2015, Vol. 62, pp. 23–62.
- Zaidner Y., Grosman L. Middle Paleolithic sidescrapers were resharped or recycled? A view from Neshar Ramla, Israe, *Quaternary International*, 2015, no. 361, pp. 178–187. DOI:10.1016/j.quaint.2014.11.037
- Zotkina L.V., Kovalev V.S. Lithic or metal tools: Techno-traceological and 3D analysis of rock art, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2019, Vol. 13. DOI: 10.1016/j.daach.2019.e00099