

МЕТОДИКА И ПРАКТИКА 3D СКАНИРОВАНИЯ РАЗНОТИПНЫХ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ АРТЕФАКТОВ¹

Михаил Вавулин, Ольга Зайцева, Андрей Пушкарев

Аннотация. В рамках проекта по созданию виртуального 3D музея «Древнее искусство Сибири», осуществляемого лабораторией социально-антропологических исследований Томского государственного университета, были проведены обширные опытные работы по сканированию разнотипных археологических артефактов. Выбор конкретного оборудования и методики сканирования в каждом случае определялся особенностями исследовательской задачи и характеристиками самих сканируемых объектов. Подробно изложены методики трехмерного сканирования керамических сосудов разных размеров и типов орнаментации, миниатюрного бронзового антропоморфного изображения, каменного тюркского изваяния и деревянной корабельной детали. Все полученные 3D модели представлены в электронном приложении к журналу.

Ключевые слова: археологическое наследие, виртуальный музей, 3D сканирование

1. Введение

Приход в последнее десятилетие 3D технологий в сферу сохранения, изучения и популяризации археологического наследия открывает все новые и новые возможности (Pavlidis et al. 2007; Bruno et al. 2010; Kuzminsky, Gardiner 2012). Создание 3D моделей наиболее значимых памятников истории и архитектуры становится глобальным проектом, реализуемым сегодня под эгидой ЮНЕСКО и других международных организаций. Особое направление в рамках этой глобальной тенденции – оцифровка музейных коллекций и создание виртуальных археологических 3D музеев.

Возможности дистанционной работы с артефактами, размещенными в сети Интернет, во много раз увеличивают скорость обмена научной информацией и позволяют познакомиться с «закрытыми» в музейных хранилищах коллекциями самой широкой аудитории. Постоянное развитие технологий делает футуристические прогнозы о том, что когда-нибудь в 3D формате можно будет оцифровать все археологические коллекции, все менее и менее фантастическими.

¹ Выполнено в рамках работ по проекту «Человек в меняющемся мире. Проблемы идентичности и социальной адаптации в истории и современности» (грант Правительства РФ П 220 № 14.В25.31.0009).

Сегодня уже и многие российские музеи начинают реализовывать проекты по созданию виртуальных туров и выставок с использованием 3D технологий. Однако пока у нас не создано ни одного полнофункционального виртуального 3D музея археологических артефактов.

Очевидно, в первую очередь это связано с трудоемкостью процесса оцифровки и высокой стоимостью оборудования для сканирования. Еще одна серьезная проблема – отсутствие исследовательских центров, объединяющих всех необходимых специалистов, занимающихся созданием 3D моделей. Ни музейные сотрудники, ни археологи, даже получив в распоряжение все необходимое дорогостоящее оборудование и программное обеспечение, не смогут самостоятельно реализовывать крупные проекты по созданию полнофункциональных виртуальных музеев. Как показывают успешные зарубежные проекты, такой коллектив обязательно должен включать технических специалистов по геомапке, 3D моделированию и программированию.

Как нам представляется, один из лучших образцов в мировой практике создания виртуальных 3D музеев археологических артефактов – это Виртуальный музей Хэмпсона (<http://hampson.cast.uark.edu>), разработанный Центром передовых пространственных технологий университета Арканзаса. В музее представлены 3D модели артефактов, в основном полученных при раскопках археологического поселения Ноде на доктором Джеймсом Хэмпсоном. В настоящее время это самый большой в мире полнофункциональный 3D музей археологических артефактов, в котором размещены 442 различных экспоната. Любой посетитель может детально рассмотреть артефакт во всех ракурсах и мельчайших подробностях и провести любые необходимые для исследований измерения. Кроме того, можно скачать модель на свой персональный компьютер, а впоследствии и распечатать объемную фотореалистичную копию любого экспоната.

Целенаправленная работа по 3D сканированию археологических артефактов в России сегодня, помимо Томского государственного университета, параллельно ведется в Иркутском государственном техническом университете (Малков 2014: 157–161; Вавулин, Пушкарев 2014). Судя по появившимся в сети Интернет информационным сообщениям, подобные работы начаты также в Археологическом центре Псковской области и Балтийском федеральном университете им. И. Канта. В общей сложности в данной перспективнейшей сфере на огромной территории нашей страны пока работают не более 10 специалистов.

В рамках проекта по созданию виртуального музея «Древнее искусство Сибири», осуществляемого лабораторией социально-антропологических исследований Томского государственного университета, проведены обширные опытные работы по сканированию разнотипных археологических артефактов. Поскольку каждый метод сканирования

обладает своими преимуществами и недостатками, выбор конкретного оборудования в каждом случае определяется особенностями исследовательской задачи и характеристиками самих сканируемых объектов.

Цель данной статьи – поделиться накопленным опытом сканирования разнотипных археологических артефактов, подробно описав разработанные методики для каждого конкретного случая, и представить полученные результаты и модели в электронном приложении к настоящему журналу. Данное приложение содержит итоговые 3D модели разнотипных артефактов, а технология создания каждой модели подробно изложена ниже.

Все модели представлены в файлах двух форматов – obj и pdf.

Формат obj широко распространен для сохранения данных 3D геометрии и может быть открыт или импортирован в большинстве программ, работающих с трехмерными полигональными моделями (3d studio max, Maya, Mesh Lab и др.). С помощью файлов формата obj возможно создание 3D копий артефактов на 3D принтере.

Формат pdf универсален для электронных документов и, помимо прочего, используется для облегчения визуализации и обмена графической информацией с возможностью интегрирования в него трехмерных моделей. Для просмотра 3D контента в формате pdf необходимо использовать программное обеспечение Adobe Reader версии 7.0 или выше.

Также для всех моделей были сделаны демонстрационные видеоролики в формате mp4, воспроизводимом всеми стандартными видеопроигрывателями.

2. Используемое оборудование и программное обеспечение

Для оцифровки небольших артефактов использовался ручной портативный 3D сканер Spider компании Artec. Он позволяет производить сканирование объектов с максимальным разрешением полигональной сети до 0,1 мм. Точность сканирования достигает 0,05 мм. Сканер способен захватывать текстуры в достаточно высоком качестве, оптимален для сканирования объектов с размерами от 50 до 200 мм. Существует возможность автономной работы от аккумулятора.

Для оцифровки средних и крупных артефактов использовался ручной портативный сканер GoScan 3D компании Steaform. Этот сканер позволяет производить сканирование объектов с максимальным разрешением до 0,5 мм. Точность сканирования до 0,1 мм. Функция захвата текстур отсутствует. Оптимален для сканирования объектов от 300 до 3 000 мм. Существует возможность автономной работы от аккумулятора.

Сканер Artec Spider способен захватывать текстуру объекта, однако в случае сканирования артефакта размером менее 50 мм, содержащего

еще более мелкие элементы, качество текстур может оказаться неудовлетворительным. В этом случае на полигональную модель накладывается текстура, полученная из фотографий объекта.

У сканера GoScan, применяемого для более крупных объектов, функция фиксации текстуры вообще отсутствует, поэтому на модели необходимо дополнительно наносить фототекстуры. Для фотографирования использовался фотоаппарат Nikon D700 с объективом Nikkor 24–70 мм 1:2.8G для средних и крупных объектов; с объективом Micro Nikkor 85 мм 1:3.5G для мелких объектов.

Работа с высокополигональными моделями требует больших вычислительных мощностей. Это особенно актуально при использовании ручных трехмерных сканеров, так как обработка информации происходит в потоковом режиме и в очень больших объемах. Для сканирования в лабораторных условиях использовался стационарный компьютер Intel Core i7-3960X 3,3GHz, 64GbRAM, nVidiaQuadro 5000 2Gb, Microsoft Windows 8 64bit.

При сканировании объектов вне лаборатории возникают сложности с транспортировкой и питанием стационарного компьютера. Там, где его использование было невозможно или нецелесообразно, сканирование осуществлялось на портативный компьютер Intel Core i5-2540M 2,6GHz, 16GbRAM, Radeon HD 6470M 1Gb, Microsoft Windows 7 64bit. По возвращении в лабораторию производился пересчет данных на стационарном компьютере до получения максимального качества.

Использовались следующее программное обеспечение: Artec Studio 9 – обеспечивает работу сканера Artec Spider; VXelements 3 – обеспечивает работу сканера Creafom GoScan 3D; Geomagic Wrap 2014 – программа для постобработки высокополигональных трехмерных моделей; Adobe Photoshop CS6 – программа для обработки фотографий и текстур.

3. Методика сканирования артефактов малых размеров

3.1. Общие особенности сканирования объектов малых размеров

Под небольшими понимаются объекты, обладающие размерами не менее 50 мм и не более 200 мм по одному из габаритных измерений. Как правило, на поверхности таких объектов имеются еще и более мелкие детали. Возможность фиксации и четкость отображения этих деталей зависят от разрешения сканера. Для корректной передачи формы используется разрешение от 50 точек на площадь квадрата со стороной наименьшего линейного размера самой мелкой детали.

Таким образом, прибор Artec Spider позволяет в высоком качестве отсканировать артефакт с деталями не менее 0,7 мм:

$$l = r \times \sqrt{p},$$

где l – наименьший линейный размер детали; r – разрешение получаемой модели (в нашем случае максимум 0,1 мм); p – количество точек на площадь минимального квадрата (не менее 9).

Артефакты с размерами менее 100 мм по трем измерениям достаточно часто содержат такие мелкие элементы, и чтобы их корректно отобразить, выходная модель должна быть максимального разрешения. В этом случае сама площадь объекта не настолько велика – обычно до двух миллионов полигонов, чтобы было целесообразно упрощать модель.

Если же сканируемый артефакт превышает данные размеры, то в целях экономии вычислительных ресурсов целесообразно, а иногда и необходимо изначально отследить, какое минимальное разрешение необходимо для фиксации всех мелких элементов объекта. Данное вычисление возможно произвести по обратной формуле, предварительно вычленив самую мелкую деталь на объекте и измерив ее по наименьшей стороне:

$$r = \frac{l}{\sqrt{p}}$$

При работе также следует учитывать специфику самого сканера. Наиболее важными функциональными особенностями оборудования являются способ позиционирования сканера и область его съемки.

Сканер Artec Spider обладает областью съемки от 90×70 до 180×140 мм в зависимости от расстояния до объекта. Позиционирование осуществляется следующим образом: программа сравнивает только что полученный кадр с предыдущим и сопоставляет их по рельефу и текстуре.

Данный способ позиционирования накладывает некоторые ограничения. Сканирование должно осуществляться непрерывно за один сеанс, так как в случае потери своей позиции достаточно сложно найти предыдущее положение и продолжить сканирование. Если объект меньше области сканирования, то желательно, чтобы он не передвигался относительно поверхности, на которой находится. Если же объект больше области съемки, то и сканер, и объект можно передвигать, однако надо избегать возможного попадания в область съемки сторонних объектов.

Для корректного сопоставления кадров у артефакта должны быть четко выражены рельеф и текстура. На объекте не должно быть однообразных, ничем не выделяющихся поверхностей, которые по площади больше, чем захватываемая область сканирования. Кроме того, при наложении кадров друг на друга существует небольшое взаимное отклонение, обычно не более 0,1 мм, что никак не влияет на качество сканирования артефактов размерами менее 180×140 мм. Но если объект выходит за данные рамки, то отклонение может накапливаться, что в

конечном итоге приведет к сильной деформации. Исходя из вышеизложенного, сканируемый артефакт не должен быть слишком большим – желательно не более 200 мм по наибольшему габаритному измерению. Для больших объектов необходимо использовать другие сканеры.

При сканировании важен не только размер и текстура, но и форма объекта. Проще всего сканировать объемные артефакты, обладающие сопоставимыми размерами по трем измерениям, имеющие углы и уплощенные грани. Такие объекты не требуют особых методик сканирования. При сканировании же объектов сложной геометрической формы может потребоваться применение специфических методик, о которых пойдет речь ниже.

3.2. Сканирование бронзовой личины из Тимирязевского курганного могильника

Объект сканирования – бронзовая антропоморфная личина. Обнаружена в ходе раскопок на Тимирязевском курганном могильнике-1 в 2014 г. (Томский район Томской области). Датируется V–VIII вв. н.э.

Артефакт представляет собой небольшой уплощенный, немного вытянутый объект с габаритными размерами 47×19×5 мм.

Объект небольшой, поэтому нет необходимости производить измерения с целью вычисления минимального разрешения, необходимого для упрощения модели. Артефакт оцифровывается с максимально возможным в нашем случае разрешением – 0,1 мм.

Хотя малые размеры избавляют от необходимости вычисления минимального разрешения, они добавляют определенные сложности в сам процесс сканирования. Артефакт занимает менее половины площади области захвата сканера, имеет уплощенную, не особо выраженную по высоте форму и однообразную текстуру. Здесь велика вероятность потери позиционирования сканера во время оцифровки. Для решения этой проблемы объект устанавливается на специальной подложке. Данная подложка должна быть многоцветной, контрастной, матовой, включать в себя множество мелких разнообразных элементов, границы между которыми должны быть четкими. Это позволяет сканеру ориентироваться не только по самому объекту, но и по текстуре окружающего его пространства. В этом случае артефакт должен оставаться неподвижным относительно цветной подложки.

Уплощенная форма объекта и его толщина менее 10 мм могут привести к еще одной проблеме при оцифровке. После двустороннего сканирования и удаления подложки область перекрытия двух моделей станет минимальной, что при совмещении двух сторон может сильно деформировать модель по толщине. Для решения данной проблемы производится третье сканирование объекта, установленного вертикаль-

но. Эта модель точно фиксирует взаиморасположение лицевой и задней граней и расстояние между ними. Затем на нее наносятся основные модели. После правильного выставления основных моделей эта опорная модель удаляется.

Сканер Artec Spider способен захватывать текстуры в достаточно высоком качестве, но данный объект слишком мелкий для построения адекватной качественной текстуры. Для текстурирования таких объектов наилучшим вариантом является наложение фототекстур, снятых на фотоаппарат с макрообъективом.

С учетом всех рассмотренных выше характеристик сканируемого объекта, работы осуществлялись по следующей методике. Артефакт укладывался на цветную подложку, распечатанную на листе формата А4 лицевой стороной вверх. Сканирование производилось под углом 45° к объекту сканером, расположенным на расстоянии 200–300 мм, при постепенном вращении подложки на 360° . По завершении полного оборота сканер на несколько секунд устанавливался вертикально над объектом. Количество сделанных кадров – 338. После завершения сканирования лицевой части объект переворачивался отсканированной стороной вниз, и процесс повторялся. Количество сделанных кадров – 316. Для третьего сканирования объект закреплялся в вертикальном положении, сканирование производилось в два полных оборота – сначала сканер располагался под углом в 45° , а затем максимально близко к горизонтальной оси, от 70 до 85° . Количество сделанных кадров – 878. Полученные три модели очищались от посторонних объектов (шумы, подложка) и совмещались в одну. После уточнения положения каждого отснятого кадра все кадры, имеющие отклонение более $0,1$ мм, удалялись. Из оставшихся кадров (общее количество – 1 468) была создана полигональная модель с разрешением в $0,1$ мм. Общее количество полигонов в полученной модели – 474 850. В программе Geomagic Wrap на модель были наложены фототекстуры.

3.3. Сканирование керамического сосуда из Кайдаловского ритуального комплекса

Объект сканирования – керамический сосуд эпохи поздней бронзы (ирменская культура) был обнаружен в ходе археологических раскопок на Кайдаловском ритуальном комплексе (Томский район Томской области). Датируется IX–VII вв. до н.э. Сосуд 120 мм высотой и 175 мм в диаметре, круглодонный, украшен орнаментом по венчику и верхней части тулова.

Как известно, керамика является одним из самых массовых и значимых археологических источников. 3D сканирование применяется сегодня не только для создания моделей, но и делает возможным разработ-

ку новых методик морфологического и типологического анализа керамики, а также применяется при виртуальной реконструкции целостного облика фрагментированных сосудов (Pires et al. 2006; Karasik, Smilansky 2008; Tucci, Cini, Nobile 2011).

Особенностью сканирования сосудов является наличие внутренней поверхности объекта. Это значительно увеличивает площадь сканирования. В нашем случае общая площадь поверхности сосуда 132 000 мм², при этом внутренняя часть составляет 46,2% от нее. Сосуд и без внутренней части является достаточно крупным объектом, а с удвоенной поверхностью для комфортной работы с моделью потребуются ее упрощение. Самой мелкой деталью у данного артефакта является ширина одной из линий орнамента. Минимальная ширина этой линии – 1 мм. Таким образом, используя ранее приведенную формулу и взяв минимальную плотность точек (9) на площадь в 1 мм², мы получаем разрешение в 0,3 мм:

$$\frac{1}{\sqrt{9}} = 0, (3).$$

В этом случае все детали, превышающие 2 мм, будут качественно отображены.

Как показала практика, для полной оцифровки сосуда такого типа достаточно сканирования в двух положениях: вверх дном и вверх венчиком. Для корректного взаиморасположения внешней и внутренней поверхностей на итоговой модели последнее сканирование должно выполняться не только с полным захватом внутренней части сосуда, но и с максимально возможным повторным сканированием внешней части объекта. Это необходимо для правильного соотношения кадров между двумя полученными моделями и компенсации погрешности между кадрами. Сопоставление двух моделей происходит по анализу геометрии объекта. Таким образом, модели регистрируются в положениях, обеспечивающих наибольшее соответствие по площади. Если внешняя сторона не будет повторно отсканирована, то автоматическая регистрация соединит внутреннюю стенку сосуда одной модели с внешней стенкой другой модели, как соответствующие по геометрии на наибольшей площади.

Данный сосуд является округлым объектом без ярко выраженных уникальных элементов: однообразный орнамент, отсутствие каких-либо геометрически выделенных элементов (ручки, налпы, сколы и пр.). Для последующего правильного соединения двух моделей перед началом сканирования необходимо нанести две или три метки, контрастирующие с основной текстурой – в области венчика и в верхней части тулова сосуда. Метки должны быть нанесены на плоских участках поверхности и не перекрывать орнамент. Также не следует делать их слишком большими, так как это может привести к потере данных о ча-

сти поверхности объекта. При дальнейшей работе отсканированные метки придется вырезать из модели вручную в программе по обработке полигональных трехмерных моделей.

С учетом всех рассмотренных выше характеристик сканируемого объекта, работы осуществлялись по следующему алгоритму. На сосуд наносились две метки из светоотражающей бумаги размером около 3 мм. Сосуд устанавливался вверх дном, сканер – на расстоянии 200–300 мм вертикально над сосудом. Сосуд постепенно поворачивался на 360°, затем сканер опускался до такого уровня, чтобы в область сканирования входило от 30 до 50% уже отсканированной поверхности, при этом ориентация сканера сохранялась перпендикулярно объекту. После этого производился разворот на 360°. Смещение повторялось до оцифровки всей поверхности. Количество сделанных кадров – 615. Та же операция производилась после смены положения объекта. Сначала сканировалась внутренняя часть объекта, а затем – еще раз внешняя. Количество сделанных кадров – 996. Две модели совмещались по установленным меткам, все кадры с отклонением более 0,1 мм удалялись. Из оставшихся 1 602 кадров была создана итоговая модель с разрешением 0,3 мм. Общее количество полигонов – 4 347 526. Стандартными средствами программы Artec Studio на модель нанесена текстура. В программе по обработке полигональных 3D моделей Geomagic Wrap были удалены вспомогательные метки.

4. Методика сканирования крупных артефактов

4.1. Общие особенности сканирования крупных объектов

Под крупными понимаются объекты, обладающие габаритными размерами от 300 до 3 000 мм. Их оцифровка осуществлялась сканером GoScan 3D.

Как и с небольшими артефактами, здесь также необходим предварительный анализ сканируемых объектов. Особенно это касается выбора разрешения, так как размеры возможных объектов сканирования сильно варьируются. При максимальном разрешении сканер позволяет качественно отобразить детали от 3,5 мм по наименьшему измерению. Детали от 1,5 мм будут зафиксированы, но в минимальном качестве. Артефакты с общей площадью более 0,5 м² не рекомендуется оцифровывать с разрешением 0,5 мм, так как большое количество полигонов выходной модели может создать трудности при дальнейшей обработке.

Главным преимуществом сканера GoScan 3D является возможность ориентации по позиционным точкам. Они представляют собой круги из белой светоотражающей бумаги диаметром 6 мм. Программа VXelements способна определить местоположение сканера в том случае, если

все его камеры одновременно фиксируют минимум четыре таких метки. Не стоит располагать их слишком часто, так как при использовании каждой метки теряется информация о поверхности объекта, расположенной под ней. Хотя программа и обладает автоматической функцией вырезания из модели позиционных точек, но полученное отверстие при этом заполняется автоматически сгенерированной «идеальной» поверхностью. Поэтому следует использовать минимальное количество точек и стараться размещать их, не закрывая важные мелкие детали. Для данного сканера с областью съемки 380×380 мм наилучшим вариантом является расположение позиционных маркеров на расстоянии 100–150 мм друг от друга. Это позволит вести комфортное сканирование без потери местоположения сканера, а количество утраченной информации об объекте будет минимальным.

Еще одним преимуществом прибора GoScan 3D и программного обеспечения VXelements является запись всего потока данных независимо от разрешения сканирования. Данная особенность позволяет изменить разрешение выходной модели после сканирования, что особенно полезно при оцифровке очень больших объектов с наличием мелких деталей. Например, необходимо получить модель достаточно большого объекта с разрешением 0,5 мм. При сканировании с максимальным разрешением, вероятнее всего, аппаратное обеспечение даже производительного компьютера не будет стабильно справляться с обработкой такого большого количества данных в реальном времени, что приведет к задержкам в записи, обработке и отображении информации. Это значительно усложнит сам процесс сканирования, а также сделает его более долгим.

В таком случае наилучшим вариантом будут сканирование объекта на пониженном разрешении (например, 5 мм) и уже последующий автоматический пересчет данных на разрешение в 0,5 мм. Данный способ поможет сократить время работы специалиста и перенести основные временные затраты на автоматическую работу компьютера. Явным недостатком такого метода является то, что нельзя сразу после сканирования увидеть итоговый результат.

4.2. Сканирование тюркского каменного изваяния

Объект сканирования – тюркское каменное изваяние. Было доставлено в Томский императорский университет В.М. Флоринским из Семиречья. В 1887 г. оно было установлено в Университетской роще. Датируется VI–IX вв.

Изваяние является стационарным, крупным, вытянутым по высоте, уплощенным объектом с габаритными размерами 483 × 168 × 1 296 мм.

Форма объекта является достаточно простой и не требует особых методик сканирования. Однако необходимо провести анализ объекта

для выбора разрешения модели. Наименьшая значимая деталь на данном объекте составляет около 12 мм. Отсюда получаем необходимое разрешение в 1,5 мм для качественного отображения и 4 мм для минимального. Сканируемый объект располагается вне помещения, что накладывает на процесс определенную специфику.

Во-первых, предполагается использование только мобильных элементов в системе сканирования. Стационарный компьютер приходится заменить на портативный. Конечно, это снижает вычислительные мощности, но, благодаря сохранению всего потока информации и возможности последующей ее обработки, все дальнейшие операции (в том числе и пересчет модели на более высокое разрешение) можно будет произвести на высокопроизводительном стационарном компьютере, а сам процесс сканирования производить на пониженном разрешении.

Во-вторых, отсутствует постоянный источник энергии. С использованием портативного компьютера единственным элементом без источника энергии остается сам сканер. Данная проблема легко решается применением генератора либо аккумулятора на 18В с силой тока 1,6А.

В-третьих, следует учитывать наличие яркого солнечного света во время сканирования. Сканер является оптическим и для захвата геометрии сам освещает объект определенным образом. При попадании на сканируемую поверхность прямых солнечных лучей осветительные приборы сканера не смогут перебить силу солнечного света, и сканирование будет невозможно. Данная проблема решается либо естественным образом (облачная погода, сумерки и пр.), либо, если первое невозможно или нецелесообразно, применением тента для создания равномерного освещения над объектом.

С учетом всех рассмотренных выше характеристик сканируемого объекта, работа осуществлялась по следующей методике. Сканирование производилось на портативный компьютер, питание сканера осуществлялось от генератора. На объект на расстоянии 100–150 мм друг от друга в хаотичном порядке наносились позиционные маркеры. Сканер располагался перпендикулярно к сканируемой поверхности на расстоянии 400–500 мм. Поочередно сканировалась каждая сторона, с постепенным перемещением сканера вокруг объекта. Сканирование осуществлялось с разрешением 5 мм с последующим пересчетом на 2,5 мм. Количество полигонов выходной модели – 250 323. В программе Geomagic Wrap на модель были наложены фототекстуры.

4.3. Сканирование фрагмента кия корабля из городища Мангазея

Объект сканирования – деревянная корабельная деталь. Датировка – XVII в. При раскопках городища Мангазея в 2008 г. были найдены де-

тали русского корабля – коча, использованные затем при постройке жилища. Сканируемая деталь – часть корабельного киля. Является автономным очень крупным и удлиненным объектом с габаритными размерами $3\,790 \times 400 \times 250$ мм.

Очень большая площадь поверхности предполагает упрощение модели. Наименьшие конструктивные элементы – отверстия под нагели – в диаметре составляют около 50 мм, однако вдоль детали проходит трещина, которую также необходимо зафиксировать. Ее ширина в среднем 10 мм. Отсюда получаем разрешение 1,5 мм для качественного отображения и 3 мм – для минимального. При такой большой площади могут возникнуть проблемы даже при сканировании на стационарный компьютер, поэтому изначальное разрешение устанавливается в 5 мм.

Применение позиционных меток делает возможным создание единой полигональной модели объекта за один сеанс сканирования. Сканирование в этом случае проходит следующим образом: сначала объект с нанесенными по всей поверхности метками укладывается на плоскость и сканируется со всех доступных сторон, затем, не отключая процесс сканирования в программе VXelements, объект переворачивается и сканирование продолжается с одной из уже оцифрованных поверхностей. При этом программа по позиционным точкам может точно установить местоположение сканера, что позволит продолжить сканирование остальных частей. В этом случае важно, чтобы объект не был плоским, поскольку сопоставление происходит по боковой грани объекта. При сканировании плоского объекта необходимо закрепить его в таком положении, чтобы наибольшие плоскости были видны на каждом этапе сканирования. Важно, чтобы на месте перехода было установлено достаточное количество позиционных точек, видимых в обоих положениях.

Важно также учитывать и материал объекта. В нашем случае это дерево. Деревянная достаточно узкая деталь такой длины может быть подвержена деформации даже под воздействием собственного веса. Это особенно важно при смене положения детали для двустороннего сканирования. Небольшие деформации (в доли миллиметра) не так страшны, потому что программа VXelements в автоматическом режиме может компенсировать такие незначительные отклонения при условии позиционирования сканера по меткам. Однако если суммарная деформация будет достигать 2–3 мм, то это уже может привести к дублированию отсканированной поверхности на разных высотах и значительным отклонениям формы полигональной модели от реальной формы объекта. Для компенсации деформации и избегания накопления суммарного отклонения как общее сканирование, так и сканирование второй стороны после смены положения объекта следует начинать с середины и продвигаться поочередно к концам детали. Таким образом любая деформация будет накапливаться лишь на расстоянии 1 895 мм (по-

ловина длины детали), а не на 7 580 мм (удвоенная длина детали), как это произойдет в случае начала сканирования с одного из концов объекта и прохождения пути сканирования по полной длине в одну сторону, а после смены положения в другую.

Учитывая все приведенные выше особенности объекта, сканирование производилось по следующей методике. Корабельная деталь устанавливалась на подставки высотой 500 мм. На все видимые участки поверхности на расстоянии 100–150 мм друг от друга в хаотичном порядке наносились позиционные маркеры. Сканер располагался перпендикулярно к поверхности объекта на расстоянии 400–500 мм в центральной части объекта. Сканирование осуществлялось от центра поочередно к каждому концу. После оцифровки всей видимой поверхности объект переворачивался и на оставшуюся поверхность также наносились позиционные метки. Сканирование продолжалось с одной из оцифрованных боковых граней в центральной части объекта и также производилось от центра к концам. Сканирование осуществлялось с разрешением 5 мм, с последующим пересчетом на 1,5 мм. Количество полигонов выходной модели – 3 585 318. В программе Geomagic Wrap на модель были наложены фототекстуры.

5. Совместное использование двух типов сканеров при оцифровке сложных объектов

Все рассмотренные ранее примеры укладывались по размерам в стандарты для различных типов сканеров. Однако существуют артефакты, находящиеся между этими рамками. Например, достаточно крупный объект, который уже невозможно отсканировать на сканер Artec Spider, но обладающий настолько мелкими деталями, что при разрешении в 0,5 мм они не будут зафиксированы. При этом мелкие детали бывают крайне важны для культурно-хронологической атрибуции артефакта. Так, очень серьезные проблемы возникли при сканировании крупного сосуда, украшенного очень мелким орнаментом, нанесенным по всей его поверхности.

Сканирование керамического сосуда с Ясунского поселения

Объект сканирования – керамический сосуд, обнаруженный на Ясунском поселении (Березовский район Ханты-Мансийского автономного округа) (Васильев, Глызин 2008: 114). Датируется второй половиной – серединой III тыс. до н.э.

Объект достаточно крупный – 312 мм в высоту и 330 мм в диаметре. Как и в случае с сосудом из Кайдаловского ритуального комплекса, наименьшее измерение важных деталей (ширина линии орнамента) составляет 1 мм, а значит, минимальное разрешение для оцифровки –

0,3 мм. В данном случае речь уже не идет об экономии ресурсов. Необходимо хотя бы в минимальном качестве отобразить важнейшие элементы сосуда, т.е. его орнамент.

Изначально было предпринято несколько неудачных попыток произвести сканирование сосуда прибором Artec Spider. Методика использовалась та же, что и при оцифровке сосуда из Кайдаловского ритуального комплекса, за исключением применения дополнительных маркеров для последующего соединения двух моделей в одну. Сосуд с Ясунского поселения отреставрирован, т.е. склеен из множества фрагментов. На нем видны трещины и искусственно восстановленные отсутствующие части – все они обладают уникальной геометрической формой и являются естественными маркерами для последующего объединения моделей. Сканирование сосуда даже с одной стороны вызывало большие сложности из-за размера объекта. После успешного сканирования двух сторон и попытки совмещения стало очевидно, что на таком большом участке поверхности суммарная погрешность достигает критических значений и очень сильно деформирует объект. При просмотре двух моделей по отдельности эта деформация не заметна. Хотя она и достигает 10–15 мм, но при общем осмотре отдельной модели пропорции визуально сохранены, а разница в диаметре на 10 мм при общем диаметре в 330 мм не заметна, так как сравнивать мы можем только визуально картинку на мониторе и реальный объект. Однако при совмещении двух сканов оказалось, что внутренняя поверхность сосуда от доньшка до 1/3 части тулова больше по размерам, чем его внешние стенки. Сканирование производилось еще несколько раз по разным методикам, но положительного результата это не дало.

После неудачных попыток оцифровки сосуда на высоком разрешении пробное сканирование было произведено прибором GoScan. Однако выходная модель с разрешением в 0,5 мм, как и предполагалось, не смогла отобразить все необходимые элементы орнамента.

В результате дальнейших экспериментов удалось разработать метод для оцифровки подобных объектов, совмещающий использование двух сканеров.

Сначала объект оцифровывается на сканер GoScan с применением позиционных меток. Это позволяет точно сохранить пропорции и размеры оцифровываемого артефакта. Модель экспортируется с разрешением 0,5 мм. Затем данная модель подгружается в программу Artec Studio, и модели, отсканированные прибором Spider, накладываются на нее, как на опорную. В этом случае кадры, получаемые при сканировании на Spider, не только регистрируются между собой, но и выравниваются по загруженной модели. Это позволяет полностью компенсировать отклонения, получаемые при выравнивании кадров. После полного выравнивания подгруженная модель удаляется и производится экспорт высокополигональной модели, отсканированной прибором Spider.

В итоге учет всех особенностей объекта позволил отсканировать его по следующей методике. На сосуд со всех сторон в хаотичном порядке на расстоянии 100–150 мм друг от друга наносились позиционные метки для сканера GoScan. Прибором, расположенным на расстоянии 400–500 мм от поверхности объекта, при постепенном вращении самого объекта на 360° сканировалась сначала внешняя поверхность сосуда. Затем сосуд переворачивался. Сканирование продолжалось с уже отсканированной поверхности с постепенным переходом на внутреннюю часть. Внутренняя часть сканировалась также с постепенным вращением сосуда. Сканирование производилось с разрешением 0,5 мм. Общее количество полигонов выходной модели – 4 081 320. Затем с сосуда снимались позиционные метки, и дальнейшее сканирование производилось прибором Artec Spider. Сканер располагался на расстоянии 200–300 мм, перпендикулярно к поверхности объекта. Сначала производилось сканирование внешней части объекта, затем внутренней, при постепенном вращении сосуда. Количество сделанных кадров внешней поверхности сосуда – 4 935. Количество кадров внутренней поверхности сосуда – 3 531. Затем в программу Artec Studio импортировалась ранее созданная модель (с разрешением 0,5 мм). Массивы кадров внешней и внутренней частей сосуда сопоставлялись с импортированной моделью по общим уникальным элементам (трещинам), видимым на всех трех моделях. Далее производились выравнивание и регистрация всех кадров. Кадры с отклонением более 0,2 мм удалялись. Опорная модель была удалена. Из оставшихся 8 009 кадров была создана итоговая полигональная модель с разрешением 0,3 мм. Общее количество полигонов – 15 315 609. Стандартными средствами программы Artec Studio на модель нанесена текстура.

6. Заключение

В настоящее время не существует универсальных методик для сканирования археологических артефактов. По сути, работа с каждым объектом – это творческий процесс, в ходе которого специальные технические знания и использование различного оборудования позволяют выработать адекватную методику и получить качественную модель. Как верно подмечено, нет никакой специальной «магии», позволяющей создавать достоверные модели, а желаемые результаты пока достигаются отнюдь не автоматически (Warden 2011).

Публикация накопленного положительного опыта, как мы надеемся, поможет другим специалистам быстрее освоить необходимые методики и ускорит глобальный процесс оцифровки археологических коллекций.

Литература

- Bruno F., Bruno S., De Sensi G., Luchi M. L., Mancuso S., Muzzupappa M.* From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition // *Journal of Cultural Heritage*. 2010. № 11 (1). P. 42–49.
- Karasik A., Smilansky U.* 3D Scanning Technology as a Standard Archaeological Tool for Pottery Analysis: Practice and Theory // *Journal of Archaeological Science*. 2008. № 35. P. 1148–1168.
- Kuzminsky S., Gardiner M.* Three-dimensional laser scanning: potential uses for museum conservation and scientific research // *Journal of Archaeological Science*. 2012. № 39. P. 2744–2751.
- Pavlidis G., Koutsoudis A., Arnaoutoglou F., Tsioukas V., Chamzas C.* Methods for 3D digitization of Cultural Heritage // *Journal of Cultural Heritage*. 2007. № 8. P. 93–98.
- Pires H. Ortiz P., Marques P., Sanchez H.* Close-range laser scanning applied to archaeological artifacts documentation. Virtual reconstruction of an XVth century ceramic pot // *International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*. 2006. P. 284–289.
- Tucci G., Cini D., Nobile A.* Effective 3D digitization of archaeological artifacts for interactive virtual museum // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2011. Vol. XXXVIII-5/W16. P. 413–420.
- Warden R.* Practical recording issues at small and large scales in Maya archaeology in Belize // XXIII CIPA Symposium. 2011. Prague, Czech Republic. Proceedings. [Электронный ресурс]. URL: <http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/PRAGUE/151.pdf> (дата обращения: 12.12.2014).
- Вавулин М.В., Пушкарев А.А.* Трехмерные модели археологических артефактов: возможности современной техники и потребности археологов // *Труды IV (XX) Всероссийского археологического съезда в Казани / Отв. ред. А.Г. Ситдиков, Н.А. Макаров, А.П. Деревянко. Казань: Отечество, 2014. Т. IV. С. 287–289.*
- Васильев Е.А., Глызин И.П.* Ясунское поселение – памятник энеолитического времени на севере Западной Сибири // *Сборник музея археологии и этнографии Сибири им. В.М. Флоринского. Вып. 2: Культуры и народы Северной Азии и сопредельных территорий в контексте междисциплинарного изучения. Томск: Томский государственный университет, 2008. С. 97–117.*
- Малков Ф.С.* Виртуальное восстановление сосудов на основе 3Д сканирования // *Древние культуры Монголии и Байкальской Сибири: Материалы V Международной научной конференции: В 2 ч. / Отв. ред. Е.В. Айыжы, Р.Ш. Харунов. Кызыл: Тувинский государственный университет, 2014. Ч. II. С. 157–161.*

Статья поступила в редакцию 2.10.2014 г.

Vavulin M.V., Zaytseva O.V., Pushkaryov A.A.

3D SCANNING TECHNIQUES AND PRACTICES USED FOR DIFFERENT TYPES OF ARCHAEOLOGICAL ARTIFACTS

Abstract. The extensive experimental studies were carried out for scanning archaeological artifacts of different types within the framework of the project aimed at establishing the virtual 3D museum of artifacts "Ancient Culture of Siberia" to be implemented by the Laboratory for Social and Anthropological Research. The choice of specific equipment and scanning techniques was determined in each case by a research task and characteristics of objects to be scanned. The 3D scanning techniques for ceramic vessels of different sizes and ornamentation types, miniature anthropomorphic images, stone Turkic sculptures, and wooden ship details are described herein in detail. All of the generated 3D models are presented in the electronic supplement to this journal.

Keywords: archaeological heritage, virtual museum, 3D scanning

References

- Bruno F., Bruno S., De Sensi G., Luchi M. L., Mancuso S., Muzzupappa M. From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition, *Journal of Cultural Heritage*, 2010, no. 11 (1), pp. 42–49.
- Karasik A., Smilansky U. 3D Scanning Technology as a Standard Archaeological Tool for Pottery Analysis: Practice and Theory, *Journal of Archaeological Science*, 2008, no. 35, pp. 1148–1168.
- Kuzminsky S., Gardiner M. Three-dimensional laser scanning: potential uses for museum conservation and scientific research, *Journal of Archaeological Science*, 2012, no. 39, pp. 2744–2751.
- Pavlidis G., Koutsoudis A., Arnaoutoglou F., Tsioukas V., Chamzas C. Methods for 3D digitization of Cultural Heritage, *Journal of Cultural Heritage*, 2007, no. 8, pp. 93–98.
- Pires H. Ortiz P., Marques P., Sanchez H. Close-range laser scanning applied to archaeological artifacts documentation. Virtual reconstruction of an XVIIth century ceramic pot, *International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, 2006, pp. 284–289.
- Tucci G., Cini D., Nobile A. Effective 3D digitization of archaeological artifacts for interactive virtual museum, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2011, Vol. XXXVIII-5/W16, pp. 413–420.
- Warden R. Practical recording issues at small and large scales in Maya archaeology in Belize, *XXIII CIPA Symposium. 2011. Prague, Czech Republic. Proceedings*. Available at: <http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/PRAGUE/151.pdf> (accessed: 12 December 2014).
- Vavulin M.V., Pushkarev A.A. Trekhmernye modeli arkheologicheskikh artefaktov: vozmozhnosti sovremennoi tekhniki i potrebnosti arkheologov [3D models of archaeological artifacts: modern technology opportunities and the needs of archaeologists], *Trudy IV (XX) Vserossiiskogo arkheologicheskogo s"ezda v Kazani* [Proceedings of the IV (XX) All-Russian archaeological congress in Kazan]. Eds. A.G. Sitdikov, N.A. Makarov, A.P. Derevianko. Kazan', Otechestvo, 2014, vol. IV, pp. 287–289.
- Vasil'ev E.A., Glyzin I.P. Iasunskoe poselenie – pamiatnik eneoliticheskogo vremeni na severe Zapadnoi Sibiri [The Yasunskoye settlement – an eneolithic site in the north of Western Siberia], *Sbornik muzeia arkheologii i etnografii Sibiri im. V.M. Florinskogo*. Vyp. 2. Kul'tury i narody Severnoi Azii i sopredel'nykh territorii v kontekste mezhdistsiplinarnogo izucheniia [A collection of V.M. Florinskiy Museum of Archaeology and Ethnography of Siberia. Issue 2. Cultures and peoples of North Asia and adjacent territories in the context of interdisciplinary research]. Tomsk, Tomskii gosudarstvennyi universitet, 2008, pp. 97–117.
- Malkov F.S. Virtual'noe vosstanovlenie sosudov na osnove 3D skanirovaniia [Virtual reconstruction of vessels based on 3D scanning], *Drevnie kul'tury Mongolii i Baikal'skoi Sibiri: Materialy V Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. V 2-kh chastiakh. Ch. II* [Ancient cultures of Mongolia and the Baikal Siberia: Proceedings of the V International research conference in two volumes. Vol. 2], Eds. E.V. Aiyzhy, R.Sh. Kharunov. Kyzyl, Tuvinskii gosudarstvennyi universitet, 2014, pp. 157–161.