

М.В. Вавулин

ТЕХНОЛОГИИ ТРЕХМЕРНОЙ ОЦИФРОВКИ КРУПНЫХ АВТОНОМНЫХ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

*Статья подготовлена в рамках проекта НУ 8.1.32.2015С
«История изучения и освоения Сибири» научного фонда Д.И. Менделеева.*

Рассматриваются особенности технологий цифровой фотограмметрии и трехмерного сканирования при создании 3D моделей крупных автономных археологических объектов. Для примера рассмотрен процесс трехмерной оцифровки части ахтерштевня коча – русского парусно-гребного судна XVI–XVII вв. Эта корабельная деталь была найдена на городище Мангазея вместе с сотнями других деталей. В 2014–2015 гг. лабораторией междисциплинарных археологических исследований «Артефакт» Томского государственного университета были произведены работы по оцифровке всего комплекса вывезенных с раскопок корабельных деталей для их сохранения в цифровом виде и дальнейшего изучения.

Ключевые слова: археологическое наследие; коч; фотограмметрия; 3D сканирование.

Трехмерные технологии в наше время стали довольно популярным и эффективным инструментом в самых различных областях науки. В том числе и в мировой археологии в последнее десятилетие наблюдается рост интереса к 3D. И это не удивительно, ведь трехмерные технологии позволяют сохранить, реконструировать и воспроизводить археологические и исторические объекты с максимальной точностью и детализацией.

Наиболее важная задача для археологов – это сохранение культурного наследия. Поэтому трехмерная оцифровка реальных археологических объектов и артефактов – наиболее актуальное направление использования 3D технологии в археологии. Одним из проектов по сохранению культурного наследия в виртуальной среде стал выполняемый лабораторией междисциплинарных археологических исследований «Артефакт» Томского государственного университета в 2014–2015 гг. проект по созданию трехмерных моделей деталей коча с городища Мангазея.

Коч – русское парусно-гребное судно XVI–XVII вв., которое достаточно часто упоминается в письменных исторических источниках [1. С. 203–213]. Однако до сих пор не установлена конструкция данного судна. В Допетровскую эпоху изготовление инженерных чертежей не практиковалось, письменные документы практически ничего говорят о конструкции коча, и пока не было найдено ни одного археологизированного корабля.

В 2000-х гг. силами сотрудников ООО «НПО “Северная археология-1”» в ходе раскопок на городище Мангазея, которое находится на территории Красноселькупского района Ямало-Ненецкого автономного округа, были обнаружены и вывезены с места раскопок более трехсот корабельных деталей [2. С. 13–18]. Данные детали были частями кочей, пришедших в Мангазею в XVII в., где они были разобраны и использованы в качестве материала для постройки домов [3. С. 123–126].

Извлеченные из слоя вечной мерзлоты деревянные детали постепенно разрушаются. Из-за огромного объема материала предпринимаемые по их консервации меры не удается провести в короткие сроки. На грани гибели сегодня оказались самые информативные источники о конструкции коча.

На сегодняшний день существует несколько технологий создания 3D моделей крупных автономных

объектов с высокой точностью. В данной статье будут представлены две наиболее популярных из них – технология фотограмметрии и технология трехмерного сканирования. Все особенности будут рассмотрены на конкретном примере – части ахтерштевня. Объект представляет собой деревянную судовую деталь размером $2,4 \times 0,34 \times 0,16$ м.

Первая рассматриваемая технология *structure from motion* (SfM), или цифровая фотограмметрия, позволяет строить трехмерную поверхность по серии фотографий объекта [4]. Данная технология является достаточно дешевым решением для создания трехмерных моделей артефактов. Она широко применяется за рубежом для создания трехмерных моделей архитектуры [5], фиксации раскопок *in situ* [6] и археологических артефактов [7]. Для сбора данных минимальный набор необходимого оборудования ограничивается цифровой фотокамерой. Последние исследования говорят, что при соблюдении данной методики погрешность измерений остается небольшой как при использовании профессиональных фотокамер, так и любительских [8]. Для обработки данных необходим персональный компьютер с соответствующим программным обеспечением. В настоящее время существует множество как платных, так и бесплатных программ для ручного или автоматического построения трехмерной модели по фотографиям [9, 10]. Мы остановились на использовании программного обеспечения *Photoscan Professional* компании *Agisoft*. Используемые алгоритмы данной программы позволяют получить в автоматическом режиме качественные модели, программа обладает всеми необходимыми функциями для построения и географической привязки моделей, простым и понятным для пользователя интерфейсом, небольшой ценой для некоммерческого использования.

Кроме низкой стоимости, следует обратить внимание и на другие особенности технологии фотограмметрии. При использовании данной технологии затрачиваемое на создание модели время смещается с этапа самой фиксации на этап обработки полученных данных. Таким образом, при необходимости обработки большого количества объектов в условиях ограниченного времени, например в экспедиции или командировке, технология фотограмметрии имеет преимущество перед другими способами 3D фиксации. Од-

нако следует учитывать, что обработка данных является достаточно длительным процессом и общее количество затрачиваемого времени может быть значительно больше, чем при использовании других технологий трехмерной оцифровки.

Технология SfM сильно зависит от человеческого фактора: от выбора правильного сценария съемки, навыков работы с фотоаппаратом и программным обеспечением. Также может потребоваться предварительная работа с фоном и освещением.

Хотя при анализе фотографий программное обеспечение очень точно высчитывает положение каждой точки поверхности модели в виртуальном пространстве, это положение является относительным. Чтобы задать модели абсолютные пространственные характеристики, необходимо вручную выставить масштаб. Для этого необходимо максимально точно знать расстояние между двумя опорными точками, что добавляет человеческий фактор в точность измерений. Как правило, чем больше фиксируемый объект, тем больше погрешность в измерениях.

Каждый артефакт уникален, и следует учитывать особенности каждого объекта при его оцифровке. Рассмотрим особенности оцифровки по технологии цифровой фотограмметрии крупных автономных археологических объектов на примере части ахтерштевня – корабельной детали коча.

Данная технология требует большого пространства вокруг объекта, в нашем случае, при длине корабельной детали в 2,4 м, максимальная дистанция до объекта, при которой он полностью входил в кадр, составляла около 3 м. В целом для фотографирования данной детали была необходима открытая площадь около 9 м².

Объект является двусторонним, а значит, при обработке фотографий будут созданы две модели из двух серий фотографий. Соединение данных моделей производится вручную по общим точкам на каждой из моделей. Указание этих точек должно быть максимально точным, так как при образовании небольшой погрешности это не будет заметно на мониторе, но фактически исказит общую формы и размеры объекта.

Деревянная деталь такой длины и сохранности может сильно деформироваться под собственным весом при смене положения. Как и при ошибочном совмещении моделей, произойдет общая деформация итоговой модели, также не заметная на первый взгляд. Имеющиеся в детали мелкие сквозные отверстия программа автоматического анализа изображений может воспринять некорректно и автоматически заполнить данное отверстие полигональной сетью. Это стоит учитывать как при фотографировании, так и при обработке. Для указания максимально точного масштаба необходимо использовать эталон, сопоставимый с длиной самого объекта, например рулетку, развернутую на длину 2,5–3 м.

Все перечисленные особенности, как технологии в целом, так и конкретного объекта, необходимо учитывать до начала сбора данных при создании сценария съемки.

Для проведения съемки использовался фотоаппарат Nikon D700 с объективом Nikkor 24–70 мм 1:2.8G.

Фотографирование каждой детали производилось в двух положениях сериями кадров по 63 и 78 шт. Деталь укладывалась на землю со свободной площадью вокруг. Фотографирование производилось с максимальным заполнением кадра деталью и параллельным смещением фотоаппарата, а также несколькими обзорными кадрами по кругу детали с полным включением объекта в область съемки (рис. 1). Время, затрачиваемое на фотографирование, – не более 10 мин.



Рис. 1. Процесс сбора данных для цифровой фотограмметрии

Обработка данных производилась на компьютере Intel Core i7 3960X 3,3GHz, 64Gb RAM, nVidia Quadro 5000 2Gb, MS Windows 8. Полученные фотоснимки импортировались в программу Agisoft Photoscan. Первым этапом работы являются анализ фотографий, поиск общих точек на фотографиях, построение разреженного облака точек в виртуальном трехмерном пространстве и расстановка камер. На втором этапе программа более подробно сравнивает фотографии на наличие общих точек между фотографиями и на их основе формирует плотное облако точек. После этого блоки двух сторон детали вручную выравниваются по общим элементам на боковых гранях и объединяются в единое плотное облако. На третьем этапе каждая точка из плотного облака соединяется с соседними полигонами, образуя трехмерную полигональную модель. На четвертом этапе на модель наносятся текстуры, извлеченные из фотографий. При максимальных настройках качества обработки на каждом из четырех этапов затраченное на обработку время составляло около 11 ч. Итоговая модель включала 9 085 634 полигона (рис. 2), что соответствует разрешению 0,55 мм.



Рис. 2. 3D модель, полученная по технологии цифровой фотограмметрии

Вторая рассматриваемая технология – трехмерное сканирование. Данная технология позволяет получать 3D модели физических объектов с помощью специального оборудования – 3D сканеров. В настоящее время на рынке представлено большое количество различных моделей 3D сканеров, каждая из которых имеет свою специализацию – одни предназначены для сканирования мелких объектов [11], другие – крупных [12], третьи – для сканирования архитектуры и ландшафта [13, 14]. Одни сканеры громоздки и должны оставаться неподвижными, и их применение возможно только в лабораторных условиях. Другие имеют небольшой размер и массу и предназначены для ручного сканирования, в том числе и в экспедиционных условиях. Третьи предназначены для установки на автомобили, самолеты или беспилотные летательные аппараты. Основным недостатком технологии трехмерного сканирования является высокая стоимость оборудования, а узкая специализация конкретных моделей приводит к необходимости приобретения нескольких сканеров, предназначенных для различных задач. Из моделей сканеров, предназначенных для сканирования крупных объектов, был выбран ручной оптический сканер GoScan 50 канадской компании Steaform как наиболее подходящий для сканирования автономных и стационарных объектов размерами от 0,5 до 5 м как в лабораторных, так и в полевых условиях [15].

При использовании технологии трехмерного сканирования основное время работы приходится на сбор данных. Затрачиваемое на обработку время невелико, к тому же данный процесс проходит в полностью автоматическом режиме.

В отличие от SfM технологии, 3D сканирование мало зависит от окружающей обстановки. Оператору нет необходимости заранее просчитывать и подготавливать место сканирования – достаточно лишь соблюдать общие методические рекомендации, изложенные в инструкции к сканеру.

Еще одним преимуществом 3D сканирования является изначально точно закрепленные единицы измерения. При создании модели она сразу масштабирована под реальные размеры сканируемого объекта. Точность же измерений гарантируется производителем и подтверждается соответствующим сертификатом.

Помимо преимуществ, технология 3D сканирования имеет определенные недостатки.

Во-первых, многие сканеры для вычисления своего местоположения в пространстве используют специальные позиционные маркеры. Установка таких маркеров на объекте приводит к неизбежной потере информации о поверхности, расположенной непосредственно под ними.

Во-вторых, в большинстве случаев захватываемая сканером текстура гораздо более низкого качества, чем текстура, снятая на профессиональный фотоаппарат.

Также рассмотрим особенности оцифровки по технологии 3D сканирования крупных автономных археологических объектов на примере части ахтерштевня коча.

В отличие от фотограмметрии, сканирование не требует большого пространства и хорошего освещения. Для сканирования достаточно расстояния в 1 м с каждой стороны объекта независимо от его размера. Также сканер снабжен собственной системой подсветки, что избавляет от необходимости учитывать окружающее освещение.

Сканирование двустороннего объекта создает дополнительные сложности, но при применении соответствующих методик данная проблема легко решается, не ухудшая качества модели [16]. В случае же, если сканируемый объект при смене положения будет деформирован, это сразу будет видно на экране монитора. Конечно, потребуются полностью пересканировать деталь с учетом возможной деформации, но если возникнут ошибки, то их можно незамедлительно обнаружить и решить на этапе сбора данных.

Деталь имеет достаточно большую площадь поверхности. При сканировании с максимальным разрешением даже мощный компьютер не в состоянии обрабатывать такой огромный поток данных в реальном времени. Однако программа позволяет произвести сканирование в меньшем разрешении, при этом сохранив весь поток данных. Позже в лабораторных условиях можно пересчитать модель на более высокое разрешение, вплоть до 0,5 мм.

Перед началом сканирования деталь прочно устанавливалась на столе высотой 0,74 м с заранее нанесенными на нее позиционными маркерами. На все стороны детали равномерно по всей поверхности наносились позиционные метки на расстоянии 15–20 см друг от друга. Сканирование начиналось с середины объекта и затем продвигалось по очереди в разные стороны (рис. 3). В качестве рабочего было установлено разрешение в 1 мм. Сканирование начиналось с середины объекта для компенсации небольших деформаций при последующей смене положения детали. После того, как все видимые стороны были отсканированы, объект переворачивался. На немаркированную поверхность также наносились позиционные метки. Сканирование продолжалось с одной из боковых сторон (там, где уже были отсканированы поверхность и положение меток) в центральной части объекта.

Затрачиваемое на сканирование время составляло около 1 ч. Последующий пересчет модели на разрешение в 0,5 мм занял около 2 ч. Итоговая модель включала 13 883 256 полигонов (рис. 4) при разрешении 0,5 мм.



Рис. 3. Процесс 3D сканирования



Рис. 4. 3D модель, полученная по технологии трехмерного сканирования

Сравнив модели, полученные с помощью технологии фотограмметрии и трехмерного сканирования, становится очевидно, что текстура модели, полученной по технологии SfM, значительно лучше. Также визуально эта модель выглядит более реалистично. Однако необходимо проверить точность измерений. В качестве эталона использовалась полученная при помощи сканирования модель. Для сравнения поверхностей двух полученных моделей использовалось программное обеспечение Geomagic Wrap. Сравнение показало, что средняя погрешность составляет 2,7 мм. Значение может показаться невысоким для столь большого объекта, однако это отклонение наблюдается не на каких-то конкретных элементах, а на положении поверхности в целом. Это значит, что полученная по технологии цифровой фотограмметрии модель искажена и имеет неверные пропорции.

На резких изгибах поверхности отклонение возрастает до 4 мм, а на участках с отверстиями – более 5 мм (достигая максимальной ошибки в 24 мм, но только на участках с автоматически построенной геометрией, что не может считаться погрешностью в измерениях).

Данная погрешность является суммарной и сложена из ошибок общей погрешности технологии двустороннего совмещения, возможной деформации и указания масштаба (рис. 5).

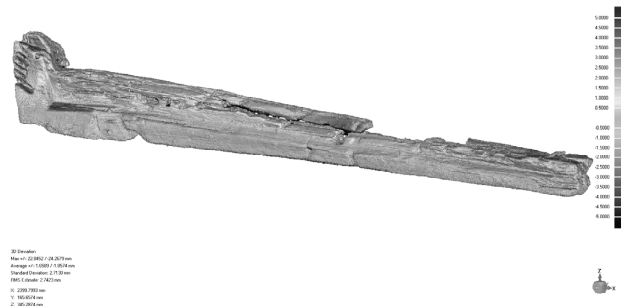


Рис. 5. Сравнение отклонений в поверхностях двух полученных моделей

Технология трехмерного сканирования полностью выигрывает по точности получаемых измерений за исключением захватываемой текстуры. Существует вариант совмещения технологий, рассмотренных выше, когда поверхность артефакта фиксируется 3D сканером, а текстуры захватываются технологией цифровой фотограмметрии – создаются две модели и в специальном программном обеспечении, например Geomagic Wrap, происходит проецирование фототекстуры на модель сканирования. В этом случае удается достичь максимального качества модели, реалистично отображающей артефакт.

Подводя итог, необходимо отметить, что выбор технологии должен складываться из совокупности всех условий, и в первую очередь из цели, которую ставит перед собой исследователь. Если необходимо в кратчайшие сроки сделать визуально реалистичные модели, при этом точность не так важна, то дешевле и проще использовать SfM технологию. В нашем случае, в ходе научно-исследовательских работ 2014–2015 гг., в связи с постоянно ухудшающимся качеством деталей и их постепенным разрушением упор был сделан на максимально точное сохранение геометрии объектов по технологии 3D сканирования. Возможен и вариант применения фотограмметрии для оцифровки объектов с максимальной точностью, когда, по тем или иным причинам, нет возможности использования сканирования. В этом случае необходимо максимально точно соблюдать методику, а также предпринять все возможные меры во избежание вероятных ошибок ручных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов М.И. История открытия и освоения Северного морского пути. Т. 1: Арктическое мореплавание с древнейших времен до середины XIX в. М., 1956. 592 с.
2. Визгалов Г.П., Пархимович С.Г. Мангазея: новые археологические исследования (материалы 2001–2004 гг.). Екатеринбург ; Нефтеюганск : Магеллан, 2008. 295 с.
3. Белов М.И., Овсянников О.В., Старков В.Ф. Мангазея. Мангазейский морской ход. М., 1980. Ч. 1. 163 с.
4. Miyatsuka Y. Archaeological real-time photogrammetric system using digital still camera // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996. Vol. 31, Pt B5. P. 374–377.
5. Ruther H., Chazan M., Schroeder R., Neeser R., Held C., Walker S.J., Matmon A., Horwitz L.K. Laser scanning for conservation and research of African cultural heritage sites: the case study of Wonderwerk Cave, South Africa // Journal of Archaeological Science. 2009. Vol. 36. P. 1847–1856.

6. De Reu J., Plets G. Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage // *Journal of Archaeological Science*. 2013. Vol. 40. P. 1108–1121.
7. Bevan A., Li X., Martinon-Torres M., Green S., Xia Y., Zhao K., Zhao Z., Ma S., Cao W., Rehren T. Computer vision, archaeological classification and China's terracotta warriors // *Journal of Archaeological Science*. 2014. Vol. 49. P. 249–254.
8. Georgopoulos A. Photogrammetric Automation: Is it worth? // Book of abstracts symposium proceedings, International Workshop on Virtual Archaeology: Museums & Cultural Tourism, 23–26 September 2015, Delphi, Greece. P. 84–87.
9. Remondino F., Del Pizzo S., Kersten T., Troisi S. Low-cost and open-source solution for automated image orientation – a critical overview // *Progress in cultural heritage preservation*. 4th International conference, EuroMed 2012, Limassol, Cyprus, October 29 – November 3, 2012. Proceedings, Springer Berlin Heidelberg, 2012. P. 40–54.
10. Kersten T.P., Lindstaedt M. Image-based low-cost system for automatic 3D recording and modelling of archaeological Finds and Objects // *Progress in Cultural Heritage Preservation: Lecture Notes in Computer Science*. 2012. Vol. 7616. P. 1–10.
11. Bruno F., Bruno S., De Sensi G., Luchi M.-L., Mancuso S., Muzzupappa M. From 3D reconstruction to virtual reality: A complex methodology for digital archaeological exhibition // *Journal of Cultural Heritage*. 2010. Vol. 11. P. 42–49.
12. Arbace L., Sonnino E., Callieri M., Dellepiane M., Fabbri M., Idelson A.L., Scopigno R. Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue // *Journal of Cultural Heritage*. 2013. Vol. 14. P. 332–345.
13. Fiorillo F., Fernandez-Palacios J.B., Remondino F., Barba S. 3D surveying and modeling of the Archaeological Area of Paestum, Italy // *Journal of Virtual Archaeological review*. 2013. Vol. 4, № 8. P. 55–60.
14. Asandulesei A., Cristi N., Asandulesei M. Archaeological prospection and natural risk management in prehistoric sites from Eastern Romania. A case study: settlement from Costesti Cier (Iasi county, Romania) // *Виртуальная археология (эффективность методов) : материалы Второй Междунар. конф., состоявшейся 1–3 июня 2015 г. в Государственном Эрмитаже*. СПб. : Изд-во Гос. Эрмитажа, 2015. С. 89–103.
15. Вавулин М.В., Зайцева О.В., Пушкарев А.А. 3D сканирование разнотипных археологических артефактов // *Сибирские исторические исследования*. 2014. № 4. С. 21–37.
16. Вавулин М.В., Зайцева О.В., Пушкарев А.А. Трехмерное сканирование и моделирование корабельных деталей коча // *Виртуальная археология (эффективность методов) : материалы Второй Междунар. конф., состоявшейся 1–3 июня 2015 г. в Государственном Эрмитаже*. СПб. : Изд-во Гос. Эрмитажа, 2015. С. 234–239.

Статья представлена научной редакцией «История» 18 января 2016 г.

3D DIGITIZING OF LARGE SEPARATE ARTIFACTS

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta – Tomsk State University Journal, 2016, 407, 55–60.

DOI: 10.17223/15617793/407/9

Vavulin Mikhail V. Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: 0002004@inbox.ru

Keywords: archaeological heritage; Koch; photogrammetry; 3D scanning.

The article investigates distinctive features of digital photogrammetry and 3D scanning technologies used to create 3D models of large separate artifacts. As an example, the author analyzes the 3D digitizing of a part of the sternpost from a koch, a Russian rowing/sailing boat of the 16th–17th centuries. This ship element was discovered in the hill fort of Mangazeya together with hundreds of other parts. Precise engineering drawings were unknown to Russian boat makers of the 17th century, while the few pictures of the koch and inconsistent written sources do not allow for an authentic reconstruction of all details and specific features of the vessel. The original boat parts discovered during the archaeological studies in Mangazeya, the first transpolar Russian town in Siberia, served the unique resource for the reconstruction. The Artifact Laboratory for Interdisciplinary Archaeological Research of Tomsk State University digitized the whole collection of excavated ship parts in 2014–2015 to preserve them for further investigations. The photogrammetry technology is characterized by low cost and quick data collection. However, the overall data processing may take several times longer than scanning alone. This technology depends heavily on human factors: the right choice of scene modes, photography/camera and software using skills. Besides, background and lighting might need additional processing. The 3D scanning technology is characterized by the high cost of equipment and a rather long process of data collection. Yet, the accuracy of measurements virtually does not depend on human factors; it is guaranteed by the manufacturer and confirmed by relevant certificates. In this case, the author used a GoScan 3D scanner produced by Creaform, a Canadian company. There is also an option of combining these two methods: geometry of the artifact surface is recorded with a 3D scanner, while textures are captured using the digital photogrammetry technology. This helps achieve the highest possible quality of the model. The choice of a digitizing technology should first of all be determined by the goal researchers pursue. In the given situation, the author focused on the 3D scanning technology to preserve the geometry as much as possible, because the integrity of the wooden ship parts had been gradually damaged. It is also possible to use photogrammetry for maximum precision digitizing, provided that procedures are strictly followed and the right scene modes are selected.

REFERENCES

1. Belov, M.I. (1956) *Istoriya otkrytiya i osvoeniya Severnogo morskogo puti* [History of the discovery and development of the Northern Sea Route]. Vol. 1. Moscow: Izd-vo Morskoy Transport.
2. Vizgalov, G.P. & Parkhimovich, S.G. (2008) *Mangazeya: novye arheologicheskie issledovaniya (materialy 2001–2004 gg.)* [Mangazeya: new archaeological research (2001–2004 materials)]. Ekaterinburg; Nefteyugansk: Magellan.
3. Belov, M.I., Ovsyannikov, O.V. & Starkov, V.F. (1980) *Mangazeya. Mangazeykiy morskoy khod* [Mangazeya. Mangazeya sea course]. Pt. 1. Moscow: Nauka.
4. Miyatsuka, Y. (1996) Archaeological real-time photogrammetric system using digital still camera. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 31, Pt. B5. pp. 374–377.
5. Ruther, H. et al. (2009) Laser scanning for conservation and research of African cultural heritage sites: the case study of Wonderwerk Cave, South Africa. *Journal of Archaeological Science*. 36. pp. 1847–1856. DOI: 10.1016/j.jas.2009.04.012
6. De Reu, J. & Plets, G. (2013) Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science*. 40. pp. 1108–1121. DOI: 10.1016/j.jas.2012.08.040
7. Bevan, A. et al. (2014) Computer vision, archaeological classification and China's terracotta warriors. *Journal of Archaeological Science*. 49. pp. 249–254. DOI: 10.1016/j.jas.2014.05.014
8. Georgopoulos, A. (2015) Photogrammetric Automation: Is it worth? International Workshop on Virtual Archaeology: *Museums & Cultural Tourism*. Book of abstracts of symposium proceedings. 23–26 September 2015. Delphi, Greece. pp. 84–87.
9. Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T. & Troisi, S. (2012) Low-cost and open-source solution for automated image orientation – a critical overview. *Progress in cultural heritage preservation*. 4th International conference, EuroMed 2012. Limassol, Cyprus. October 29 – November 3, 2012. Proceedings. Springer Berlin Heidelberg. pp. 40–54.

10. Kersten, T.P. & Lindstaedt, M. (2012) Image-based low-cost system for automatic 3D recording and modelling of archaeological Finds and Objects. *Progress in Cultural Heritage Preservation: Lecture Notes in Computer Science*. 7616. pp. 1–10. DOI: 10.1007/978-3-642-34234-9_1
11. Bruno, F. et al. (2010) From 3D reconstruction to virtual reality: A complex methodology for digital archaeological exhibition. *Journal of Cultural Heritage*. 11. pp. 42–49. DOI: 10.1016/j.culher.2009.02.006
12. Arbace, L. et al. (2013) Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. *Journal of Cultural Heritage*. 14. pp. 332–345. DOI: 10.1016/j.culher.2012.06.008
13. Fiorillo, F., Fernandez-Palacios, J.B., Remondino, F. & Barba, S. (2013) 3D surveying and modeling of the Archaeological Area of Paestum, Italy. *Virtual Archaeological Review*. 4:8. pp. 55–60. DOI: 10.4995/var.2013.4306
14. Asandulesei, A., Cristi, N. & Asandulesei, M. (2015) Archaeological prospection and natural risk management in prehistoric sites from Eastern Romania. A case study: settlement from Costesti Cier (Iasi county, Romania). *Virtual'naya arkheologiya (effektivnost' metodov)* [Virtual Archaeology (the effectiveness of methods)]. Proceedings of the second international conference. 1–3 June 2015. State Hermitage Museum. St. Petersburg: Izd-vo Gos. Ermitazha. pp. 89–103.
15. Vavulin, M.V., Zaytseva, O.V. & Pushkarev, A.A. (2014) 3D Scanning Techniques and Practices used for Different Types of Archaeological Artifacts. *Sibirskie istoricheskie issledovaniya – Siberian Historical Research*. 4. pp. 21–37. (In Russian).
16. Vavulin, M.V., Zaytseva, O.V. & Pushkarev, A.A. (2015) [3D scanning and modeling of ship parts of the koch]. *Virtual'naya arkheologiya (effektivnost' metodov)* [Virtual Archaeology (the effectiveness of methods)]. Proceedings of the second international conference. 1–3 June 2015. State Hermitage Museum. St. Petersburg: Izd-vo Gos. Ermitazha. pp. 234–239. (In Russian).

Received: 18 January 2016