



THE STATE HERMITAGE MUSEUM

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭРМИТАЖ

VIRTUAL ARCHAEOLOGY

(Methods and benefits)

Proceedings of the Second International Conference
held at the State Hermitage Museum
1–3 June 2015

Saint Petersburg
The State Hermitage Publishers
2015

ВИРТУАЛЬНАЯ АРХЕОЛОГИЯ

(эффективность методов)

Материалы Второй Международной конференции,
состоявшейся в Государственном Эрмитаже
1–3 июня 2015 года

Санкт-Петербург
Издательство Государственного Эрмитажа
2015

УДК 930.26(063)

ББК (Т)63.4

В52

Печатается по решению
Редакционно-издательского совета
Государственного Эрмитажа

Программный комитет конференции:

П. Рейли (Великобритания)

М. Форте (США)

И. Лирицис (Греция)

Ф. Николучи (Италия)

В. Нойбауэр (Австрия)

Научный редактор:

Д. Ю. Гук

Редакционная коллегия:

А. Ю. Алексеев

Л. С. Воротинская

П. Рейли

А. Мойлемеестер

В52 Виртуальная археология (эффективность методов) : материалы Второй Международной конференции, состоявшейся 1–3 июня 2015 года в Государственном Эрмитаже / Государственный Эрмитаж. – СПб. : Изд-во Гос. Эрмитажа, 2015. – с. : ил.

ISBN 978-5-93572-608-9

Первая Международная конференция по виртуальной археологии была организована Отделом археологии Восточной Европы и Сибири Государственного Эрмитажа (Санкт-Петербург, Российская Федерация) в 2012 году. На конференции впервые были установлены связи между специалистами, работающими в разных странах. Активную роль в подготовке следующей конференции «Виртуальная археология» сыграли Государственный Эрмитаж и АДИТ (Некоммерческое партнёрство по автоматизации музейной деятельности и новым информационным технологиям), обеспечившие работу тематического информационного ресурса www.virtualarchaeology.ru. Цели второй конференции заключались в обсуждении методик, применяемых в виртуальной археологии, постановке задач и представлении результатов исследований.

Проект выполнен при поддержке Благотворительного фонда В. Потанина в рамках программы «Музейный десант».

Издание предназначено для археологов и специалистов по информационным технологиям.

УДК 930.26(063)

ББК (Т)63.4

На обложке: логотип конференции
«Виртуальная археология», автор Д. Ю. Гук

ISBN 978-5-93572-608-9

© Авторы, тексты, иллюстрации, 2015

© Государственный Эрмитаж, 2015



Д. Ю. Гук

Государственный Эрмитаж, Россия

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВИРТУАЛЬНОЙ АРХЕОЛОГИИ

«Дух виртуальной археологии»: исходный вариант

Вводя в 1990 году в научный оборот понятие *виртуальная археология*, Пол Рейли принимал во внимание основные факторы, влиявшие в тот период на развитие археологии, в первую очередь британской: лоббирование охранной археологии (спасательных работ), этические нормы профессиональной среды, моделирование процессов полевых исследований и появившиеся новые технологии. Активное развитие компьютерных технологий входило в противоречие с традиционными представлениями об археологии, в связи с чем была предложена концепция виртуальности (Reilly 1991). Компьютерное моделирование противопоставлялось концепции *невоспроизводимого эксперимента*, а автоматизация обработки информации обеспечивала упорядочивание и ускорение обработки неоднородных массивов данных (Beale, Reilly 2014. P. 123). Виртуальная археология «описывала способ использования технологий для получения новых методов документирования, интерпретирования и описания исходных археологических материалов и процессов и побуждала специалистов-практиков изучать взаимодействие между цифровой и обычной археологической практикой» (Beale, Reilly 2014. P. 124). Вследствие этого ожидался *гносеологический прорыв* в традиционной археологической практике фиксации и представления данных полевых исследований посредством создания компьютерной модели, наглядно демонстрировавшей «не только, что было и что есть, но и что могло бы быть» (Beale, Reilly 2014. P. 124). Естественно, предполагалось широкое использование средств компьютерной графики. Но вместо решения первоначальной задачи, состоявшей в приспособлении компьютерных технологий к использованию в традиционной археологической практике, произошла подмена понятий. Концепция виртуальной археологии, подразумевавшая описание средствами компьютерного моделирования сущности, изменяющейся в силу своей природы и потенциально способной измениться, стала заложницей определения *виртуальный*. Так случилось со многими другими понятиями из-за неправильного употребления профессионального термина, заимствованного гуманитарными науками из области информатики и компьютерных технологий, например, с понятием *виртуальная реальность* (Sterne 2003. P. 370). В результате был утрачен «дух виртуальной археологии», а сама виртуальная археология стала ассоциироваться с рядом конкретных методов и технологий и частными случаями их применения в археологической практике (Beale, Reilly 2014. P. 125).

Современные проблемы виртуальной археологии

Многомерная компьютерная графика, базы данных и гипертекстовые ссылки, безусловно, являются полезными программными средствами для упорядочивания

и представления информации. Стремительное развитие портативных устройств и средств связи позволяет практически везде и всегда иметь доступ к огромному массиву данных и предоставлять услуги по обеспечению справочной информацией. Модели реально существующих объектов и их реконструкций дают возможность их беспрепятственного изучения в любой точке земного шара, воспроизведения и тиражирования посредством трёхмерной печати. Но все эти технические и технологические достижения не приводят нас к решению задачи, первоначально поставленной перед виртуальной археологией – проводить дискуссии о результатах моделирования для проверки научной гипотезы.

В 2012 году в Санкт-Петербурге прошла Первая Международная конференция по виртуальной археологии (Виртуальная археология 2013), участники которой обратили внимание на необходимость уточнения понятия и методов виртуальной археологии. С этой целью был создан и продолжает поддерживаться благодаря усилиям Государственного Эрмитажа и НП АДИТ двуязычный информационный ресурс «Виртуальная археология» (www.virtualarchaeology.ru). Постоянное общение специалистов из разных стран в сети Интернет и активное обсуждение на круглых столах в рамках конференции САА2014 (САА 2014) обеспечили наиболее представительный состав участников следующей конференции, организованной, так же, как и первая, по инициативе Отдела археологии Восточной Европы и Сибири Государственного Эрмитажа. Можно с удовлетворением отметить, что со времени предыдущей конференции получили новое развитие теоретические основы виртуальной археологии, накопился практический опыт применения методов виртуальной археологии в полевых исследованиях и определились наиболее актуальные направления виртуальной археологии.

Во-первых, предварительные комплексные исследования археологических памятников (магниторазведка, аэрофотосъёмка, лазерное сканирование и др.) в плане перспективности ведения раскопок и выявления границ культурного слоя. Наибольший эффект достигается в случае применения нескольких методов и анализа информации с учётом накопленных ранее эмпирических данных, полученных на аналогичных памятниках. Во-вторых, фиксация всех этапов археологических раскопок, что позволяет не только документировать процесс в виде цифровых снимков, но и воспроизводить его на цифровой модели. В-третьих, развивается направление по созданию виртуальных сред для представления результатов археологических исследований широкой публике на сайтах, посвящённых культурному наследию и непосредственно на туристических объектах (музеи, достопримечательности, заповедники и пр.).

Увеличился объём данных, которые накоплены исследователями, не только за счёт новых методов их получения, но и за счёт возможности их обработки. Например, моделирование системы подземных пещер в Орегоне – объекта культурного наследия – позволяет отслеживать малейшие изменения в состоянии памятника за счёт обработки огромного массива сигналов датчиков (<http://www.nps.gov/orca/photosmultimedia/webcam.htm>). Следующий положительный результат связан с преемственностью и последовательностью технологий. Возможность 3D-печати была бы не так привлекательна, если бы не были созданы точные цифровые модели, позволяющие воспроизводить археологические находки и объекты (Beale, Reilly 2014). Определённый прогресс в решении задач был отмечен благодаря возможностям интеграции информации в цифровых архивах и обработки данных на естественном языке, преодолению языковых барьеров средствами математической лингвистики и новым теориям, преобразовывающим традиционную археологию. Социальные

сети в информационном обществе выполняют функцию пространства научной коммуникации (Гук, Определёнов 2014). Изменили они отношение к традиционной археологии или развили виртуальную археологию? На самом деле они только увеличили скорость обработки данных. Надежды исследователей, предполагавших, что компьютерные методы обеспечат некий прорыв в понимании исторических процессов, не оправдались.

Спорные моменты в методике

В последнее время наметилась тенденция возврата к первоначальному тезису о проверке научных гипотез средствами виртуальной реальности, возвращению духа *виртуальной археологии* (Pletinckx 2009; Виртуальная археология 2013; Beale, Reilly 2014). Компьютерная модель последовательности событий в качестве доказательства гипотезы является более ценным инструментом для историков. Они применяют ГИС-технологии, специальные компьютерные пакеты, чтобы проверить свои предположения и подтвердить выводы (Гук 2014). Научный мир не настолько велик и, как правило, дистанцируется от музеев. В то же время музеи распространяют свои функции на виртуальное пространство и нуждаются в тесном сотрудничестве со специалистами в области компьютерных технологий (Hermon, Hazan 2013). Накопленные в цифровых форматах данные требуют не только архивирования, но и перевода в более новые, актуальные форматы, воспринимаемые современными программными и аппаратными средствами. На их сохранение и обеспечение доступа будущим поколениям уходит половина всего времени специалистов по компьютерным технологиям. Но все эти исходные данные, какими бы ценными они ни были, в исходном виде не могут быть представлены публике. Для этого разрабатывается определённая информационная система, которая включает ряд данных (числа, тексты, изображения, видео, звуки), сценарий их демонстрации, и некоторые устройства, функционирующие согласно описанному алгоритму. Это работа специалистов в области мультимедиа. Никто не скажет специалистам музеев, что они должны представлять и как. Успешные образцы в этой области также редки, как хорошая современная архитектура. Поэтому достаточно часто пытаются копировать удачные примеры программ, не вникая в причины успеха той или иной разработки. Таким образом, мы наблюдаем имитации и так называемую *мультимедийную моду* (Sterne 2003). Всё и везде становится одинаковым и, как следствие, безликим. Ситуация напоминает систему общественного питания, где основная масса предпочитает «быстрое питание» и «дежурное блюдо», и только гурманы готовы ждать и тратить усилия на приготовление деликатеса. Вот почему в музеях так актуален вопрос о предоставлении качественного информационного обеспечения, особенно, на археологических экспозициях. Посетитель музея не заинтересован в экспликации или общем фильме по тематике экспозиции (Hookk et al. 2015). Началась эпоха кросс-платформенных решений (Kuroczyński et al. 2015; Гук, Определёнов 2015), когда одна и та же информация доступна через Интернет на любых видах мобильных устройств.

Какова реальная проблема, с которой сталкиваются музеи, осваивая виртуальное пространство? В самом начале, когда виртуальная археология только появилась, её главной целью была названа *визуализация* (Reilly 1991; Hookk 2014). Все усилия разработчиков были направлены на точную и натуралистичную передачу образов археологических объектов и мест. Детальная проработка текстур в компьютерных программах – очень трудоемкий процесс, и пока на него затрачивается время, недавние новые технологии уже становятся частью истории самих методов компьютерной обработки

данных. Сегодня очевидно, что для моделирования процесса достаточно схемы или многомерной цифровой модели (Neubauer 2008). Таким образом, реконструкции и в первую очередь визуализация с фотографической точностью не так важны для ученых. Для плодотворного обсуждения научной гипотезы или реконструкции требуется в первую очередь динамическая трёхмерная модель. Разница между проекцией на плоскость, то есть двухмерным представлением, и трёхмерной моделью, которая может быть масштабирована и изменена во времени, заключается в динамике. Первая представляет собой статичное изображение и может быть выполнена в любом графическом редакторе, а вторая требует применения специальных программ: игровых движков или систем трёхмерного моделирования, а для показа – специальных программных приложений.

Потенциальные возможности виртуальной археологии

В чём кроется потенциальная возможность прорыва? Для этого нужно осознать, что виртуальность не является стабильной, постоянной. Это то же самое, что и переход от двухмерной системы координат к трёхмерной. Плоский экран дает нам фиксированную картину как листок бумаги, эффекты стерео помогают создать иллюзию трёхмерности, но только оптически. И наконец, изображение в состоянии двигаться в границах дисплея или во времени. Последняя особенность является самой важной. Наше оцифрованное культурное наследие изменяется с течением времени. Эти изменения могут повторяться и ими можно управлять. Таким образом, в цифровом пространстве мы получаем власть над цифровыми объектами. Компьютерные игры так привлекательны потому, что они с лёгкостью дают возможность изменить роли, повторить жизнь, начав её сначала (эффект «дня сурка»), произвести любые операции в стране чудес, находясь при этом в совершенно другом месте и других условиях. Учитывая эти психологические опасности, мы должны с большой аккуратностью использовать потенциал *виртуального воссоздания* нашего культурного наследия. Вообразите, если вы разрушаете замок, то никогда не увидите его снова, даже если поменяете роль или перезапустите игру. Ситуация в игре становится аналогом реальности. Возможно, что таким способом мы сможем вынудить людей заботиться о реальных объектах. Но такие опции доступны только в отдельных онлайн-играх.

У виртуальных миров имеется большой потенциал, который может быть использован для получения знаний и обучения (Rayan 2001; Frischer et al. 2002; Forte 2013; Forte 2014). Комплекс Реставрационно-хранительского центра Государственного Эрмитажа «Старая Деревня» как нельзя лучше символизирует три способа представления знания: масштабирование, трансдукцию и материализацию (Архитектура виртуальных миров 2009. С. 265). Все вышеупомянутые возможности приобретения знаний недоступны в реальном мире, но они обладают огромным потенциалом в научной работе и образовании. В виртуальном мире можно изменять свои пространственные характеристики относительно изучаемого объекта для его более детального изучения. Онежские петроглифы, многократно увеличенные изображения которых нанесены на гранитную облицовку арки, украшающей фасад здания, видны всем и представлены в удобном ракурсе. Ассоциирующийся с солнцем, благополучием, роскошью золотой цвет здания – это преобразованная информация (трансдукция), при визуальном восприятии которой создаётся невероятно сильный положительный эмоциональный настрой, связанный с этими наскальными изображениями. Наконец, материализация – процесс создания вещественного представления абстрактных понятий. Мечта любого музея о новом выставочном пространстве, о современном

здании для музейных фондов, в котором будут соблюдены все условия хранения, нормы пожарной безопасности и охраны труда, обеспечены климатический контроль и безопасность, а также предоставлены комфортные условия труда для сотрудников, неожиданно для многих оказалась *виртуальной реальностью*, то есть потенциально возможной формой существования при определённых условиях и обстоятельствах.

Литература

Виртуальная археология 2013

Виртуальная археология (неразрушающие методы) / науч. ред. Д. Ю. Гук. СПб. : Изд-во Государственного Эрмитажа, 2013.

Гук 2014

Гук Д. Ю. Исторические реконструкции: от идеи к виртуальному воплощению // Труды IV (XX) Всероссийского археологического съезда в Казани. Казань : Отечество, 2014. Т. 4. С. 294–296.

Гук, Определёнов 2014

Гук Д. Ю., Определёнов В. В. Виртуальное пространство как место межмузейной коммуникации // Современные тенденции в развитии музеев и музееведения. Новосибирск : Автограф, 2014. С. 63–70.

Гук, Определёнов 2015

Гук Д. Ю., Определёнов В. В. Информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) в межмузейных научных проектах: онтология и прогноз // Роль музеев в информационном обеспечении исторической науки. М., 2015 (*в печати*).

Архитектура виртуальных миров 2009

Архитектура виртуальных миров: монография / А. Е. Войскунский, М. Б. Игнатьев, С. А. Козловский, А. А. Никитин, А. В. Никитин, Н. Н. Решетникова, С. П. Сенющенко, О. В. Смылова, М. А. Селисская, С. С. Трошин; под ред. М. Б. Игнатьева, А. В. Никитина, А. Е. Войскунского; 2-е изд., перераб. и доп. СПб. : ГУАП, 2009.

Beale, Reilly 2014

Beale G., Reilly P. Virtual archaeology in a material world: new technologies enabling novel perspectives // CAA 2014 Paris: 21st Century Archaeology. Paris, 2014. <http://eprints.soton.ac.uk/364454/1/VA%20in%20material%20world%20CAA14%20Paris.pdf>. Accessed: 01. 02. 2015.

CAA 2014

Computers Applications & Quantitative Methods in Archaeology. Session, Roundtable & Workshop List. Paris, 2014. Accessed: http://caa2014.sciencesconf.org/conference/caa2014/pages/CAA2014_list_of_sessions_V1.pdf. Accessed: 01. 02. 2015.

Forte 2013

Forte M. Immersive 3D applications in archaeology // Oxford Companion to Archaeology / ed. by N.A. Silberman. NY. : Oxford University Press, 2013.

Forte 2014

Forte M. Cyberarchaeology: a post-virtual perspective // Humanities and Digital. A visioning statement. Cambridge : MIT Press, 2014.

Frischer et al. 2002

Frischer B., Niccolucci F., Ryan N., Barcelò J. A. From CVR to CVRO: the past, present and future of cultural virtual reality // Virtual archaeology. Proceedings of the VAST Euroconference, Arezzo. BAR International Series 1075. Oxford : Achaeopress, 2002. Pp. 7–18.

Hermon, Hazan 2013

Hermon S., Hazan S. Rethinking the virtual museum // Manuscript accepted for publication at the “Digital Heritage” congress 2013 proceedings, IEEE special edition. Marseille, 2013. Pp. 625–632.

Hookk 2014

Hookk D. Yu. From Illusion to reality: transformation of the term “virtual archaeology” // Archaeological and anthropological sciences, June. Berlin; Heidelberg : Springer, 2014. Pp. 1–4.

Hookk et al. 2015

Hookk D. Yu., Opredelenov V. V., Kharitonova T. Yu. Modeling of a communication with virtual visitors of the museum web-site “Virtual archaeology” // Proceedings of CAA 2015. Siena, 2014. Pp. 246–247 .

Kuroczyński et al. 2015

Kuroczyński P., Hauck O. B., Dworak D., Lutteroth J. Virtual museum of destroyed cultural heritage – 3D documentation, reconstruction and visualization in the semantic Web // Виртуальная археология (эффективность методов): материалы Второй Международной конференции. СПб. : Изд-во Государственного Эрмитажа, 2015. С. 54.

Neubauer 2008

Neubauer W. From practice to theory expanding the stratigraphic recording into real 3D // Interdisziplinäre Forschungsplattform für Archäologie der Universität Wien. Wien: VIVAS, 2008. Pp. 31–36. http://vias-geo.univie.ac.at/uploads/media/31-36_NeubauerStratigraphic.pdf. Accessed: 01.02.2015.

Pletinckx 2009

Pletinckx D. Virtual archaeology as an integrated preservation method // Arqueológica. 2009. Vol. 2. Pp. 51–55.

Rayan 2001

Rayan N. Documenting and validating virtual archaeology // Archeologia e Calcolatori. 2001. Vol. 12. Pp. 245–273.

Reilly 1991

Reilly P. Towards a virtual archaeology // Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990. BAR International Series 271. Oxford : B.A.R, 1991. Pp. 132–139.

Sterne 2003

Sterne J. Bourdieu, technique and technology // Cultural studies. 2003. Vol. 17 (3/4). Pp. 367–389.

P. Reilly

University of Southampton, UK

PUTTING THE MATERIALS BACK INTO VIRTUAL ARCHAEOLOGY

Introduction

Archaeology since its inception has always had a bias towards scopic discourse and privileged the visual over other senses (Thomas 2008). However, it has become increasingly obvious over the last decade or so that there is a manifest “tension between this ocular-centric tradition on the one hand, and the inherently multisensory nature of both material culture, and of the archaeological process on the other” (Hamilakis 2014, p. 210). In addition, a growing body of work implicates materiality as the catalyst for activating the synaesthetic and kinaesthetic sensory perception skills that archaeologists must use in order to engage creatively and critically with past material culture in the present (e.g. MacGregor 1999; Watson, Keating 1999; Cummings 2002; Hurcombe 2007; Ingold 2007a; Knappett 2007; Skeates 2010; Laneri 2011; Hamilakis 2014; Till 2014). As Tim Ingold succinctly sums it up: “the world of materials is not only a world we can think about but one that we can think with” (Ingold 2007b, p. 36).

Virtual archaeology is increasingly out of step with these theoretical developments. David Kirch, for instance, observes that: “[t]he practices of archaeologists in the field involve more modalities and more material engagement than are likely to be supported in virtual environments for some time” (Kirch 2010, p. 119). Furthermore, “to meet the deepest needs of archaeologists, virtual environments must move beyond the purely visual to include the tangible (Kirch 2010, p. 124).

With its long history of different, sometimes ambiguous and contradictory, connotations (e.g. Hookk 2014), virtual archaeology is the embodiment of scopic discourse *par excellence*. Nowadays, the term is predominantly associated with the use of 3D computer graphics or geophysical data imaging for archaeological research. Admittedly, attempts to produce virtual auralisations provide rare exceptions to the scopic norm (e.g. Pope, Chalmers 2000; Cooper 2014). Whilst both schools are valid forms of virtual archaeology, even when combined, they encompass a much more restrictive field of endeavour than was first envisaged. I argue that by unduly privileging the scopic, virtual archaeologists have unwittingly diverted attention away from other multi- and inter-sensorial modes of engagement with significant sections of the archaeological record.

As originally articulated, virtual archaeology described the use of digital technologies, more generally, as tools for mediating and engaging with conventional (analogue) archaeological processes (Reilly 1991; 1992). However, it was not only about *what was* or *what is*, it was intended, principally, to be a generative environment for rethinking archaeological approaches to the creative adoption of technology (Beale, Reilly 2015); in other words, what might come to fruition or, perhaps better, the art of the possible. Elsewhere I expand upon the ontological relationship between virtual archaeology and the digital archaeological record (Reilly 2015). Gareth Beale and I also argue that the *spirit* of this broader and more generative conception of

virtual archaeology remains useful for emphasising the intersection of technology, archaeological practice and the digital archaeological record (Beale, Reilly in press).

In this paper, I propose that additive manufacturing technology has advanced to the point where it is possible to start considering how practitioners, using the vehicle of virtual archaeology, might meaningfully begin to (re)introduce some of the kinaesthetic elements and enactive context that archaeologists enjoy in the field, and thereby expand the parameters of archaeological discourse.

I will begin with a brief outline of contemporary additive manufacturing before exploring a number of recent applications germane to archaeological concerns. For an in-depth survey of the field, in non-technical terms, one can refer to (Lipson, Kurman 2013).

Additive manufacturing summarised

Additive manufacturing is an umbrella term which encompasses an ever expanding range of fabricating technologies. In recent years, it has risen to popular prominence in the form of 3D printing and rapid prototyping, as this form of technology has become affordable to a broad-based community of self-styled “makers”.

Makers take materials seriously. They print all kinds of *tactile* substances: from bread dough, chocolate and other food-based materials with their pronounced *olfactory* characteristics (which, incidentally, introduces another inter-sensory modality into the mix), to gypsum, concrete, sand, soil, terracotta, metal alloys, plastics, polymers and composites.

At a somewhat higher level of technological sophistication, modern industrial additive manufacturing technologies span a huge spectrum of applications and traverse a very broad range of scales: bioprinting living ink; replacement body parts and prosthetics; manufactured textiles; ceramics; glassware; jewellery; furniture; weapons; vehicle components; innumerable parts and fixtures, including replacement components for the 3D printers themselves; even entire buildings. Crucially, they can also combine *multiple entangled materials* (e.g. Lipson, Kurman 2013).

Hod Lipson and Melba Kurman (Lipson, Kurman 2013, p. 265) summarise the evolution of additive manufacturing as three stages of gaining control over physical matter. The first stage is an unprecedented control over the *geometry*, or shape, of objects. As we have already intimated, 3D printers can already fabricate objects of almost any material in any shape. Next, we gain control over the *composition* of matter. We have already entered into this second stage, going beyond just shaping external geometries to crafting the internal structure of materials with unprecedented fidelity, with the possibility of printing multiple materials including “entangled components” which can be co-fabricated simultaneously. The final stage is control over the *behaviour* of materials, where they envisage programmable digital (or “smart”) materials which are made of discrete, discontinuous units and are designed to function in a desired way. For example, a complex, heterogeneous, arrangement of materials such as oval-shaped, translucent, amber-coloured resin, containing black, insect-like inclusions could be specified and fabricated today (Vaezi et al. 2013; Vidimče et al. 2013). In addition, such voxel-based printing affords the notion of different types of (multi-)material voxels (Hiller, Lipson 2009). In principle, one can imagine a library of archaeologically-defined material voxel types available to represent artefacts, buildings and even the contexts uncovered through fieldwork.

Control over *shape* provides a bridge between existing 3D modelling formats and the ability to repurpose them as 3D printed physical objects. Existing point clouds, terrain and solid models, indeed any system that can output STL format files, can be 3D printed. Naturally, some archaeologists were quick to *grasp* the potential of this technology.

Additive archaeology in the making

The foundations on which we may ground the creative application of additive manufacturing in archaeology and related disciplines, primarily in the form of 3D printing and rapid prototyping, is therefore actually already quite well established. I shall employ *size* and *scale* as the two principal organising factors behind the projects I cite below to demonstrate how this technology impinges, or enhances, on our abilities to apprehend an archaeological place or object in a multimodal, material manner.

Additive archaeology and monuments in the landscape

Possibly the earliest extant example of a 3D print of an ancient monument is a rather small (i.e., ca. 40 mm×40 mm × 20 mm) but detailed instantiation of the huge, 6th-century, basilica of Hagia Sophia in Istanbul, with its 16th-century minarets. This remarkable artefact was produced in 1995/96 by a group of MIT engineers testing their technology, using dry alumina powder with a special binding solution on an MIT Alpha 3D printer. The STL file they used to produce a 3D print of this iconic building appears to have been an arbitrarily selected download (Krassenstein 2014).

Although an experimental piece, the 3D print of the Hagia Sophia edifice could have easily slipped, unremarked, into the long tradition of pedagogic scaled models and public exhibits that populate many museums and heritage centres. This would, however, have been remiss of us. The fact that MIT Museum holds the Alpha 3D printer in their collection (Krassenstein 2014) rather than this 3D printed artefact underscores the importance attached to the developments in the process of production that the project represents, and the rather incidental significance of the application domain selected to demonstrate the technology. By highlighting the primary motivation for creating the Hagia Sophia 3D print (i.e., providing a suitable engineering use-case) we draw attention to the constant requirement to critically appraise the integrity of the data underpinning such material outputs. Crucially, this helps us avoid the pitfalls that befell an entelechy of practitioners in the 1980s and 1990s. Once it was realised how easily visualisations “could so beguilingly elide distinctions between information and speculation” (Denard 2012, p. 65) a framework for promoting methodological rigour was developed for, and then enshrined in, the London Charter. Adherence to these principles promotes good practice. It is important to stress that these standards are equally pertinent when adopting additive manufacturing as a means of research and for communicating archaeology (and cultural heritage in general).

In contrast to the near solipsistic solitude of the screenic virtual tour, physical models foster multiple imbricated experiences as individuals mingle, albeit within the very constrained kinaesthetic experience afforded to those who drift around the margins of dioramas, which are made distant by their scale, and remote by their island pedestals. As Björn Nilsson notes, “[t]he diorama forces us to think and act relationally, and to construct material contexts that consist of more than the things connected to archaeological features” (Nilsson 2006, p. 30). Mention can be made of some recent, professionally informed, 3D printed exhibits, which can be regarded as state of the art of this genre of museum communication. For example, De Nieuwe Kerk in Amsterdam, in collaboration with Nanjing Museum in China, produced an evolving diorama of the entire Forbidden City of the Ming period. The model was fabricated day and night throughout the course of the exhibition at a scale of 1:300. Visitors were therefore able to watch the 3D printers live-at-work and witness some of the 980 buildings being added to the floor plan daily (Milkert 2014). The fabrication element introduces a quirky temporal dimension, a reminder that unlike the physical model

or the electronic artefact which subsists in digital stasis, the original Forbidden City is not a static, timeless, disassociated enclosure.

In a similar vein, an enormous diorama of the complete early 18th-century town of Saint Petersburg, Russia, has been fabricated at a scale of 1:87. Not all the 26,000 printed objects in this assemblage represent the buildings and architecture of the town (Smart Printing n.d.). A considerable number of animated figures represent the town’s inhabitants during the period of Peter the Great. This printed ensemble of “lively” townsfolk, horse-and-carriages, and even sailing ships, lends an element of dynamism and draws attention away from the periphery and into the heart of this panoply.

Also in the same genre, but with the underpinning empirical data explicitly cited, archaeologists in Britain are 3D printing topographic models of expanses of the archaeological landscape of the New Forest in Hampshire. Earthworks such as hillforts are modelled using digital elevation measurements derived from Lidar surveys (NewForestArchaeology 2015).

The exploration and affectivity of 3D printed models should by no means be considered as always being restricted by a distancing gaze. Developments elsewhere promise much closer material engagement through this technology. In the construction industry, for example, additive manufacturing is evolving rapidly from an architect’s modelling tool to a delivery mechanism for full-scale architectural components and other elements of, or indeed complete, buildings. In other words, highly detailed and large scale complexes, including both existing monuments and archaeological “reconstructions”, can be (re)fabricated today (Lim et al. 2010). For example, the CAD files developed to build the Mount Carmel of America monastery in Wyoming were first used to fabricate a large scale architectural model of this complex, which was designed in classic French gothic style as per the Carmelite tradition, including flying buttresses (McCrery Architects 2014).

Moving into much more immersive environments, full or human-scale fabrications afford authentic kinaesthetic and synaesthetic (multimodal) sensuous explorations of their construction and material properties. Swiss architects (Hansmeyer, Dillenburger 2014) have already designed and fabricated an ultra-modern, gothic-like, construction dubbed the “Digital Grotesque”. This human-scale, room-like, structure was assembled from 64 massive separate printed sandstone-like parts, and required 260 million surface facets printed at a resolution of a tenth of a millimetre to create the elaborate “carved” decoration on the “stone” blocks.

Expanding, still further, additive manufactured habitations are already available internationally. For example, China-based construction firm Sunwun offers “printed” multi-story residential buildings, including a 1,100 m² villa complete with both exterior and interior decorations (Kira 2015). Looking towards a more distant horizon, the European Space Agency and architects Foster+Partners are developing experimental fabricators which can utilise 3D regolith materials to fabricate lunar or planetary bases. These projects currently involve the use of terrestrial simulants, in other words materials with the same necessary material properties (ESA 2014).

In short, virtual archaeology is entering an era in which matter matters, where virtual models could be materialised in the physical world, at full scale, affording the possibility of full-bodied, kinaesthetic, multi-sensory exploration. Given the growing list of heritage sites under stress from visitor numbers, together with a proven model of heritage management using compelling reproductions (e.g. Ouzman 2006, p. 274; Williams 2013) it is surely only a matter of time before we see printed heritage centres.

Escaping the vitrine – additive archaeology and the finds record

The stresses of wear and tear are, of course, not restricted to buildings and monuments. Until the 18th century, handling curiosities and rarities was an integral part of the process of exploring the objects held in the private collections of the day. Whilst access was restricted to a small, socially privileged, section of the population, this was largely unproblematic. However, the opening up of museums to a much broader public during the 19th century led to a gradual proscription of multisensory forms of engagement. The ascendancy and ultimate dominance of the visual discourse through encased exhibits, mediated by curators, was a response to the patent need to protect and provide security for collections from these burgeoning audiences. In the laboratory context, behind closed doors, however, curators and museum professionals still enjoyed the freedom to touch, sound, smell, manipulate, as well as gaze upon, the *sensible objects* in their collections (Edwards et al. 2006, p. 19). "Such privilege evidences the fact that knowing-through-sensing beyond the visual is still regarded as necessary to the achievement of adequate understanding of material culture" (Edwards et al. 2006).

At an international level we are witnessing the great museums of the world virtually flinging open the doors to their magazines and vitrines and making them available far beyond the confines of their hallowed galleries. This signals a fundamental shift towards facilitation and empowerment of a broad public to connect, affectively, and engage independently, in a multi-sensorial exploration of their material past. The Smithsonian Museum, for example, has embarked on the ambitious X3D project, which aims to digitalise all 137 million iconic items in its collection, and make libraries of them available for 3D printing anywhere in the world (Clough 2013, Pp. 5, 32). In so doing, we should note, they are also making them available for transcultural discourses within *ethnographic archaeologies* in which a multiplicity of stakeholders and publics, with their many diverse and perhaps conflicting claims over these material pasts, co-produce new contexts, assemblages, narratives and meanings (Castañeda, Mathews 2008). The first *virtual museums* are already effectively "mashing-up" collections and enabling anyone, anywhere on the planet with Internet access, to download and 3D print their own bespoke museum collection (e.g. Lincoln 3D Scans 2014).

Since the turn of the millennium, a growing number of archaeologists have also been re-asserting the importance of a multi-sensory approach to analysing and unlocking the meanings of material objects in field, teaching and research situations: Gavin MacGregor (1999), for instance, describes how touch and movement were instrumental in helping him gain new insights from Iron Age carved stone balls; Vicki Cummings (2002) suggests that texture imparted meanings and messages in the Neolithic period to those who touched contemporaneous tombs in southwestern Wales and southwestern Scotland; Linda Hurcombe (2007, p. 534) notes that the quality of conchoidal fractures on lithics can be heard; Carl Knappett (2007, p. 21) relates an account in which archaeologists closed their eyes and sorted pottery sherds by touch and sound. Unsurprisingly then, with this growing compendium of case studies, it is at the level of the archaeological finds record that additive manufacturing is currently gaining most traction with practitioners, as increasingly powerful but affordable technology makes it a compelling proposition for re-instantiating artefacts and other objects. This is particularly true of museums and institutions trying to break free of the visual shackles inherent in the long-standing glass-case model and their legacy of seemingly aloof and unapproachable artefacts. Shwe Soe et al. (2012, p. 444) neatly sum up how 3D printed objects mitigate many of the concerns of old school curatorship, offering instead a powerful mode of facilitation for multiple constituencies: "having a physical object to hold, turn, weigh up and explore allows the individual to become familiar with the artefact and to understand its application without interfering with the original item" (which may be too fragile, unwieldy, sacred, or rare to be subjected to handling).

Early human and hominid remains can be particularly fragmentary and fragile and consequently opportunities for handling and re-arranging specimens, even for the anointed specialist, are strictly limited. Rapid prototyping and reverse engineering technologies, however, enable palaeontologists, archaeologists and conservators to 3D print biomodels (i.e., anatomical structures in which the external and internal morphological details of the original specimen are faithfully reproduced in robust materials). Not only do they afford morphological assessment and specimen reconstruction, restitution or restoration (D'Urso et al. 2000), they may be combined with complimentary biomodels derived for different find spots to create more all-encompassing, composite models for critical exploration (Peres et al. 2004). Even potentially irreversible procedures, such as forensic facial reconstruction, can be attempted using reverse-engineered skulls, which avoids compromising the integrity of the original objects (e.g. Fantini et al. 2008).

Radically invasive procedures which were once unjustifiable can now quite literally open up previously inaccessible parts of priceless objects. CT scanners are being employed to extract the detailed internal morphology of Mesopotamian bullae. In this Neolithic and Bronze Age record-keeping technology accounting tokens are sealed inside hollow clay envelopes. The hidden tokens are revealed by breaking apart the inexpensive, but *geometrically* identical, 3D prints derived from the scans subjected to detailed haptovisual inspection (Kaelin 2013; Marko 2014).

Building on the possibilities of having multiple instantiations of an object available for analysis, it is not, conceptually, a big step to consider the potential for materialising multiple *versions* of an object. Bruno Latour and Adam Lowe (2011) make this point forcefully when they suggest that curators should invite several art historians to demonstrate different, creative restoration alternatives through material facsimiles. Compared to such a vibrant, multi-threaded approach one can now only frown at the convention whereby the installed curator decides on *the* "ideal state" to which the object should be restored; "this is the past state *that best embodies the values important to the custodian* – and other stakeholders as well – without irreversibly impairing other values that may be ascendant in the future" (Applebaum 2007, p. 195, my emphasis). Latour and Lowe are essentially challenging the illusion of stasis, and its apparent teleological inevitability, produced by the traditional mono-vocal, curator-led, interpretative process. By advocating in its stead a multi-vocal, perhaps multi-sensory, appraisal of the many possible modes of production, they draw attention to the multiplicity of creativity and meanings embodied in the original.

To summarise the above, additive manufacturing enables archaeologists to produce clones, copies, facsimiles, imitations and replicas and make them available for repetitive multi-sensorial engagement. Secure in our ability to make reproductions, the biographical threads attached to the prototypes can be both teased out, or braided together, to investigate and present the accumulated meanings, connections and values associated with objects of significance. However, the same technologies allow us to burst out of these still rather procrustean registers to (re)materialise artefacts and assemblages in a huge range of different substances, at various scales, with any number of material enhancements, including, amongst others, morphology, texture, appearance as well as new mechanical properties, qualities and affordances, in any spatio-temporal locale with an internet presence.

Control over the material characteristics has profound implications for how interested parties could "get to grips" with objects of significance in the future. Aside from the possibility of exploiting invasive procedures, many objects can now be safely and productively reiterated in materials that allow manipulations that would be otherwise impossible to consider. Fragile, brittle objects can be reiterated in supple, hard wearing materials. Opaque

elements can be rendered transparent. In fact, myriad other novel material co-productions can now be imagined and attempted to help *open up* significant objects and artefacts to novel physical explorations in order to extract new insights, significance and meaning. For example, marine archaeologists in Wales employed additive manufacturing technology, using synthetic materials processing with the desired functional, mechanical and aesthetic properties required to reconstruct and reverse engineer a medieval wooden ship found in the River Usk. In addition to producing an accurate geometric model this research demonstrated “how the potential to control material characteristics... [principally, through the relative stiffness and flex of component member] can contribute to a better understanding of the original artefact’s construction than is possible in traditional approaches” (Soe et al. 2012, p. 449).

Additive archaeology in the field

In this final section we will consider briefly how additive manufacturing technology has the potential to revolutionise the “archaeological record” that field archaeologists produce. I start with a handful of use-cases that have already been implemented using well established additive manufacturing processes. I finish with a more speculative, but not far-fetched, outline of what might come to pass in the not too distant future.

Many geophysical survey techniques allow archaeologists and geologists to locate and measure the surfaces of buried deposits. Such measurements are readily transformed into digital surface models allowing individual layers to be isolated and converted into a 3D printable format such as STL. Geologists in Germany have demonstrated the efficacy of this technique by printing a stack of geological strata from the north-east of the country. Although, each separate stratum is output individually as a solid object made in a single material (but in different colours), with the same density throughout (Loewe et al. 2013), geoscientists stress that the physical instantiation of the strata improves communication by once again making the topic of discussion very tangible (e.g. Hasiuk 2014).

At much finer level of resolution, soil scientists are 3D printing detailed soil structures of microcosms extracted using computed tomography (e.g. “repacked sieved loamy sand” and “undisturbed soil samples with macro-pores”) for experimental purposes (Otten et al. 2012). Exploitation of this fruitful combination of technologies at the micron scale is therefore already a reality. Archaeologists are also producing ultra-high definition archaeological records of, for example, a coin hoard found near Selby in the north of England, which can now be disaggregated, separated, translated into different materials, and re-aggregated and rematerialised; CT data were processed to produce an animation (Miles, Cox 2013) and extract some of the coins for 3D printing (Miles 2012; Miles, Cox 2013).

Additive manufacturing is thus demonstrably pushing the envelope of archaeological field recording standards. Currently, most archaeological applications are producing materially homogeneous objects of well-defined shapes. Second- and future-generation additive manufacturing technologies allow the production of multi-material geometries with functionally graded materials and microstructures using the AMF industry file format (ASTM ISO 2013). What is striking about the AMF standard is that it encapsulates many of the elements found on modern archaeological excavation recording sheets (e.g. shape, material composition and metadata describing the feature or context) but in much greater micro morphological and spatial detail. This suggests that it might be possible to refine archaeological recording to a level of precision with which very accurate 3D rematerialisations become possible. In this scenario excavation becomes a *repeatable* experiment with many possible narratives.

Conclusion

Additive manufacturing poses some very important ontological questions as concepts such as real, virtual and authentic are becoming increasingly unstable as archaeological artefacts, assemblages and structures can be reiterated, extended and distributed through time and space as 3D printable physical entities by almost anyone, anywhere. It also challenges current epistemological norms in terms of how archaeological knowledge is characterised. We are just beginning to detect the profound effects that this expanded capability to (re)make both identical and completely different material reiterations based on the same prototype will have on the nature of material culture and the material processes of archaeology. Without doubt artefacts and assemblages will be extended in new digital and material directions, by a more broadly based set of interested constituencies, adding new, perhaps contentious, significances, meanings and connections to their already multi-threaded biographies. *Vive la difference!*

Advances in additive manufacturing technology represent a fertile field in which it may be possible to cultivate new productive, post-screenic, hybrids of physical and virtual archaeology. Such additive archaeologies allow us to augment the traditional scopic discourse with more tangible intra-actions with our material past. By reinstating material elements within virtual archaeologies we reintroduce synaesthetic and kinaesthetic components of full-bodied, multi-sensorial perception, and hence some of the enactive context that archaeologists enjoy in the field.

References

Applebaum 2007

Applebaum B. Conservation Treatment Methodology. Oxford : Butterworth, 2007.

ASTM ISO 2013

ASTM ISO / ASTM52915-13, Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.1, ASTM International. West Conshohocken, PA, 2013. Available: www.astm.org. Accessed 31 January 2015.

Beale, Reilly 2015

Beale G., Reilly P. Additive archaeology: The spirit of virtual archaeology reprinted. Archaeological Research in the Digital Age. Proceedings of the 1st Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Greek Chapter (CAA-GR). Rethymno, Crete, 6–8 March 2014 / C. Papadopoulos, E. Paliou, A. Chrysanthi, E. Kotoula, A. Sarris (eds.). Rethymno: Institute for Mediterranean Studies – Foundation of Research and Technology (IMS-Forth), 2015. Pp. 122–130.

Beale, Reilly in press

Beale G., Reilly P. After virtual archaeology: rethinking archaeological approaches to the adoption of technology. Internet Archaeology (in press).

Castañeda, Mathews 2008

Castañeda Q.E., Mathews C.N. Ethnographic Archaeologies: Reflections on Stakeholders and Archaeological Practices. Lanham : Altamira Press, 2008.

Classen, Howe 2006

Classen C., Howe D. The museum as sensescape: Western sensibilities and indigenous artifacts / in E. Edwards C. Gosden R.B. Phillips (eds.). Sensible Objects: Colonialism, Museums and Material Culture. Oxford : Berg, 2006. Pp. 199–222.

Clough 2013

Clough G.W. Best of Both Worlds. Museums, Libraries, and Archives in a Digital Age. Washington : Smithsonian Institution. 2013.

Cooper 2014

Cooper C.E. The Exploration of Lived Experience in Medieval Buildings through the Use of Digital Technologies. Ph.D thesis. Department of Archaeology, University of Southampton. 2014 (unpublished).

Cummings 2002

Cummings V. Experiencing texture and transformation in the British Neolithic // Oxford Journal of Archaeology 21(3). 2002. Pp. 249–261.

Denard 2012

Denard H. A new introduction to the London Charter / in A. Bentkowska-Kafel, D. Baker, H. Denard (eds.). Paradata and Transparency in Virtual Heritage. Digital Research in the Arts and Humanities Series. London : Ashgate, 2012. Pp. 57–71.

D'Urso et al. 2000

D'Urso P.S., Thompson, R.G., Earwaker, W.J. Stereographic (SL) biomodelling in palaeontology: a technical note. Rapid Prototyping Journal 6(3). 2000. Pp. 212–215.

Edwards et al. 2006

Edwards E., Gosden C., Phillips R.B. Introduction / in E. Edwards, C. Gosden, R.B. Phillips (eds.). Sensible Objects: Colonialism, Museums and Material Culture. Oxford : Berg, 2006. Pp. 1–31.

ESA 2014

Building a Lunar Base with 3D Printing. 2014. Available: http://www.esa.int/Our_Activities/Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing. Accessed 31 January 2015.

Fantini et al. 2008

Fantini M., de Crescenzo F., Persani F., Benazzi G., Gruppioni G. 3D restitution, restoration and prototyping of a medieval damaged skull // Journal of Rapid Prototyping 14(5). 2008. Pp. 318–324.

Hamilakis 2014

Hamilakis Y. Archaeology and the Senses. Human Experience, Memory, and Affect. Cambridge : Cambridge University Press, 2014.

Hansmeyer, Dillenburger 2014

Hansmeyer M., Dillenburger B. Digital Grotesque. Available: <http://www.digital-grotesque.com>. Accessed 31 January 2015.

Hasiuk 2014

Hasiuk, F. Making things geological: 3-D printing in the geosciences // GSA Today 24(8). 2014. Pp. 28–29.

Hiller, Lipson 2009

Hiller J., Lipson H. Design and analysis of digital materials for physical 3D voxel printing // Rapid Prototyping Journal 15(2). 2009. Pp. 137–149.

Hookk 2014

Hookk D.Yu. From illusions to reality: transformations of the term “virtual archaeology”. Archaeological and Anthropological Sciences June. Berlin, Heidelberg : Springer, 2014. Pp. 1–4.

Hurcombe 2007

Hurcombe L. A sense of materials and sensory perception in concepts of materiality // World Archaeology 39(4). 2007. Pp. 532–545.

Ingold 2007a

Ingold T. Materials against materiality // Archaeological Dialogues 14(1). 2007. Pp. 1–16.

Ingold 2007b

Ingold T. Writing texts, reading materials. A response to my critics // Archaeological Dialogues 14(1). 2007. Pp. 31–38.

Kaelin 2013

Kaelin B. Cornell Professors 3D Print Cuneiform Tablets. 2013. Available: <http://www.3dprinterworld.com/article/cornell-professors-3d-print-cuneiform-tablets>. Accessed 31 January 2015.

Kira 2015

Kira. Exclusive: WinSun China Builds World's First 3D Printed Villa and Tallest 3D Printed Apartment Building. Available: <http://www.3ders.org/articles/20150118-winsun-builds-world-first-3d-printed-villa-and-tallest-3d-printed-building-in-china.html>. Accessed 31 January 2015.

Kirch 2010

Kirch D. Comparing tangible and virtual exploration of archaeological objects / in M. Forte (ed.). Cyber-Archaeology. BAR Series 2177. Oxford : Archaeopress, 2010.

Knappett 2007

Knappett C. Materials with materiality // Archaeological Dialogues 14(1). 2007. Pp. 20–23.

Krassenstein 2014

Krassenstein B. A 20-Year-Old 3D Printed Object Emerges from the Dust at MIT. 2014. Available: <http://3dprint.com/12179/old-3D-prints-hagia-sophia>. Accessed 31 January 2015.

Laneri 2011

Laneri N. Connecting fragments: a sensorial approach to the materialization of religious beliefs in rural Mesopotamia at the beginning of the second millennium BC // Cambridge Archaeological Journal 21. 2011. Pp. 77–94.

Latour, Lowe 2011

Latour B., Lowe A. The migration of aura, or how to explore the original through its facsimiles / in T. Bartscherer, R. Coover (eds.). Switching Codes. Chicago: Chicago University Press, 2011. Pp. 275–298.

Lim et al. 2010

Lim S., Buswell R.G., Le T.T., Austin S.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. Automation in Construction 21. 2011. Pp. 262–268.

Lincoln 3D Scans 2014

Lincoln 3D Scans Lets You 3D Print Your own Museum. 2014. Available: <http://www.3ders.org/articles/20140202-lincoln-3d-scans-lets-you-3d-print-your-own-museum.html>. Accessed 31 January 2015.

Lipson, Kurman 2013

Lipson H., Kurman M. Fabricated: The New World of 3D Printing. Indianapolis : Wiley, 2013.

Loewe et al. 2013

Loewe P., Klump J., Wickert J. Scientific 3D Printing: A Work in Progress Report. 2013. Available: <http://www.slideshare.net/loewe/scientific-3d-printing-gfz-geoinformatics-kolloquium-april-2012>. Accessed 31 January 2015.

MacGregor 1999

MacGregor G. Making sense of the past in the present: A sensory analysis of carved stone balls // *World Archaeology* 31(2). 1999. Pp. 258–271.

McCrery Architects 2014

McCrery Architects. The New Mount Carmel of America Monastery, Park County, Wyoming. 2014. Available: <http://www.mccreryarchitects.com/portfolio/liturgical/new-mount-carmel-of-america>. Accessed 31 January 2015.

Marko 2014

Marko A. The Modern Ancient Tablet. A Curatorial Intervention. 2014. Available: <http://curatorial-practicum.wordpress.com/2014/05/04/the-modern-ancient-tablet/>. Accessed 31 January 2015.

Miles 2012

Miles J. Computed Tomography Scanning of Roman Coins. 2012. Available: <http://acrg.soton.ac.uk/blog/1168>. Accessed 31 January 2015.

Miles, Cox 2013

Miles J., Cox G. Animation Showing Computed Tomography of Coin Hoard and Visualisation of the Hoard. 2013. Available: <http://vimeo.com/45452797>. Accessed 31 January 2015.

Milkert 2015

Milkert H. Incredible 26,000 Piece, 16,146 sqft 3D Printed Model of 18th Century Saint Petersburg, Russia. Available: <http://3dprint.com/14143/st-petersburg-russia-3d-print>. Accessed 31 January 2015.

NewForestArchaeology 2015

NewForestArchaeology. Our First #3D Printed #Lidar Model Fresh off the 'Press' Ready for our Temporary Exhibition Later in the Year. 2015. Available: <https://twitter.com/NewForestArch/status/552481397701881856>. Accessed 28 January 2015.

Nilsson 2007

Nilsson B. An archaeology of material stories. Dioramas as illustration and the desire of a thingless archaeology // *Archaeological Dialogues* 14(1). 2007. Pp. 27–30.

Otten et al. 2012

Otten W., Pajor R., Schmidt S., Baveye P.C., Hague R., Falconer R.E. Combining X-ray CT and 3D printing technology to produce microcosms with replicable, complex pore geometries. *Soil Biology & Biochemistry* 51. 2012. Pp. 53–55.

Ouzman 2006

Ouzman S. The beauty of letting go: fragmentary museums and archaeologies of archive. In E. Edwards, C. Gosden, R.B. Phillips (eds.), *Sensible Objects: Colonialism, Museums and Material Culture*. Oxford : Berg. Pp. 269–301.

Peres et al. 2004

Peres F., Taha F., de Lumley M.-A., Cabanis E. Digital modelling and stereographic production of a Homo Erectus skull / *Rapid Prototyping Journal* 10(4). 2004. Pp. 247–254.

Pope, Chalmers 2000

Pope J., Chalmers A. Pre-rendering acoustics and illumination for archaeological reconstructions // *Virtual Reality in Archaeology*. BAR International Series 843 / in J.A. Barceló, M. Forte, D.H. Sanders (eds.). Oxford : Archaeopress, 2000. Pp. 105–110.

Reilly 1991

Reilly P. Towards a virtual archaeology // *Applications and Quantitative Methods in Archaeology*. BAR International Series 565 / in S. Rahtz, K. Lockyear (eds.). CAA90. Computer Oxford : Tempus Reparatum, 1990. Pp. 132–139.

Reilly 1992

Reilly P. Three-dimensional modelling and primary archaeological data Archaeology in the Information Age: a Global Perspective / in P. Reilly, S. Rahtz (eds.). London : Routledge. Pp. 145–173.

Reilly 2015

Reilly P. Additive archaeology: an alternative framework for recontextualising archaeological entities. In *Open Archaeology (Special Issue Challenging Digital Archaeology)*. 2015 (in press).

Skeates 2010

Skeates R. *An Archaeology of the Senses: Prehistoric Malta*. Oxford : Oxford University Press, 2010.

Smart Printing n.d.

3d Printed Model of St. Petersburg. Available: <http://www.smartprinting.co/3d-printing-news/3d-printed-model-of-st-petersburg>. Accessed 31 January 2015.

Soe et al. 2012

Soe S.P., Evers D.R., Jones T., Nayling N. Additive manufacturing for archaeological reconstruction of a ship // *Rapid Prototyping Journal* 18(6). 2012. Pp. 443–450.

Till 2014

Till R. Sound archaeology: terminology, palaeolithic cave art and the soundscape // *World Archaeology* 46 (3). 2014. Pp. 292–304.

Thomas 2008

Thomas J. On the ocularcentrism of archaeology. *Archaeology and the Politics of Vision in a Post-Modern Context* / in J. Thomas, V. Oliveira Jorge (eds.). Newcastle : Cambridge Scholars Publishing, 2008. Pp. 1–12.

Vaezi et al. 2013

Vaezi M., Chianrabutra S., Mellor B., Yang S. Multiple material additive manufacturing – part 1: a review // *Virtual and Physical Prototyping* 8(1). 2013. Pp. 19–50.

Vidimče 2013

Vidimče K., Wang S.P., Ragan-Kelle J., Matusik W. OpenFab: a programmable pipeline for multi-material fabrication. *ACM Transactions on Graphics (TOG) – SIGGRAPH 2013 Conference Proceedings* 3(4). 2013. Available: <http://openfab.mit.edu>. Accessed 31 January 2015.

Watson, Keating 1999

Watson A., Keating D. Architecture and sound: an acoustic analysis of megalithic monuments in pre-historic Britain // *Antiquity* 73. 1999. Pp. 325–336.

Williams 2013

Williams A.R. Replica of King Tut's Tomb to Open in Egypt. Exact copy will be near the Valley of the Kings, site of the original tomb. 2013. Available: <http://news.nationalgeographic.com/news/2013/10/131026-king-tut-tomb-replica-ancient-egypt-pharaoh-archaeology-science>. Accessed 25 January 2015.

ДОПОЛНЕННАЯ РЕАЛЬНОСТЬ В АРХЕОЛОГИИ AUGMENTED REALITY IN ARCHAEOLOGY

S. Hermon
STARC, Cyprus Institute, Cyprus

F. Niccolucci
PIN, VAST-LAB, Italy

3D ARCHAEOLOGY: RESEARCH METHODOLOGY AND APPLICABILITY ASPECTS – SOME PRELIMINARY THOUGHTS

Introduction: a brief history of 3D in archaeology

Archaeology is the scientific discipline that systematically studies tangible material culture remains from the past, in order to understand their cultural, social or economic context, its primary assumption being that there is indeed such relation, namely that artefacts are the result of “social actions on matter” (Lemonnier 1986). Such studies are performed on various scales of detail, from the objects themselves (stylistic, morphology, technological, typological, use, etc.), to their natural / anthropogenic context (the excavation and its stratigraphy), to the relationship with other artefacts, features or architectonic remains (spatial distribution) and on to inter / intra site variability and regional studies, within a single period of time or diachronic studies. As such, archaeology is intrinsically a study in an Euclidian space, namely it deals with the study of three-dimensional objects. However, most research, was, and still is, performed on two-dimensional, pictography representations of artefacts and their archaeological context (drawings, sections, plans, etc.), the rare 3D drawings being mostly limited to proposals of hypotheses on how a building may have looked like in the past, a statue or a complex of statues may have looked like, such representations having usually an informative scope, rather than a scientific one.

Since the last two decades we are witnessing and living in a “digital revolution”, which influences all sciences (Hilbert, López 2011), archaeology being swapped within this trend as well (Evans, Daly 2006). Interestingly, research in this domain was mainly led by computer science researchers, who, following in many cases an enthusiasm for archaeology, tried to elucidate what they thought are major challenges in archaeology. Such research focused on optimising realism of 3D digital representations of artefacts or monuments (e.g. Mueller et al. 2004), development of algorithms for faster renderings and scene creation (Rossignac, Borrel 1993), the use of virtual archaeology for educational purposes (e.g. Sanders 1999) or packages for the 3D communication of cultural heritage (Forte 1997; Niccolucci, Hermon 2002; Silberman 2004), leading to a flux of products and outcomes popularising 3d modelling and virtual reality as means to disseminate cultural heritage. Perhaps as a response to these efforts, a charter, detailing the principles for a computer-based visualisation of cultural heritage (quote) has been proposed as a set of guidelines to the scientific community (<http://www.londoncharter.org>).

Additional research lines focused on automatising the classification of pottery fragments and the related refitting process (Karasik, Smilansky 2011; Kampel, Sablatnig 2001, Iannone et al. 2011), 3D recording and visualisation of the excavation process itself (Reilly 1992), performing GIS based analyses within a 3D virtual environment (Katsianis et al. 2008) or large-scale reconstructions of urban environments (Mueller 2007) and their simulated past social / cultural dynamics (Shao, Terzopoulos 2006).

Another important milestone in the research on 3D archaeology is solving the issue of representation of uncertain (fuzzy) data (Niccolucci, Hermon 2010). Incomplete, partial or unknown data is an integral part of the archaeological reality and, in the past, several statistical approaches have been proposed to mainly complete this gap (Buck et al. 1996). The 3D digital reconstruction process further adds additional layers of “data incompleteness”: dealing with such an incomplete data and its consequent reliability (also related to the concept of “data provenance”, discussed below) and the reliability of the digital reconstruction itself, product of pure imagination or based on “scientific facts”. The proposed solution derives from the fuzzy sets theory, where a “reliability” index is assigned to each distinct component of the 3D reconstruction, the final visualisation outcome being subject to a “confidence” threshold, which controls the levels of details shown, along a line with the extremes on “totally reliable data” to “pure imaginative data” (Hermon, Nikodem 2008).

A recent overview of the literature shows several development lines, theoretical aspects being addressed by proposals such as “cyber-archaeology” (Forte 2010) or computation intelligence in archaeology (Barceló 2009), while most efforts being diverted towards more practical issues, such as 3D documentation methods (of excavations, architectural remains, objects or cultural landscapes), using various methods, techniques or instruments (Mingquan et al. 2012). Articles discuss data optimisation algorithms, comparison of data capture methods and the consequent post-processing stage (Contreras et al. 2013) or the efficiency of such (3D) recording of archaeological remains in terms of speeding-up the field documentation process (Hermon et al. 2012) while in the same time increasing its accuracy and level of details. Latest developments in the field regard the interrelated concepts of repositories of 3D data and their use in large-scale virtual research environments and shared digital infrastructures (Felicetti, Niccolucci 2011). Effort is directed towards semantic definitions of 3D models (Ronzino et al. 2012), the related metadata description and issues of inter-operability (Pitzalis et al. 2010) and optimisation of online access to 3D models (Larue et al. 2012).

The brief summary given above presents an interesting picture of research development: a very dynamic start, with a plentitude of discussions and details on the potential of 3D visualisation, modelling, virtual reality and alike terms for the research in archaeology, followed by a slight shift of interest towards their potential for the communication of archaeological results or their use as educational tools. Most recent research topics concern optimisation of data capture workflow and development of repositories for 3D data and their inter-operability, leaving somehow uncovered the field of defining and developing a 3D based research methodology in archaeology. The following section will provide some basic ideas that propose to fill this gap and offer preliminary solutions on how to apply 3D in archaeological research for addressing typical questions of the field, pose and answer new ones and at the same time comply with basic requirements from any research field, i.e. data transparency and duplicability of research.

3D archaeology – towards the definition of a research methodology

Trying to define a robust and clear 3D research methodology requires a few basic preliminary steps, which need to be clarified. We refer to research methodology in 3D ar-

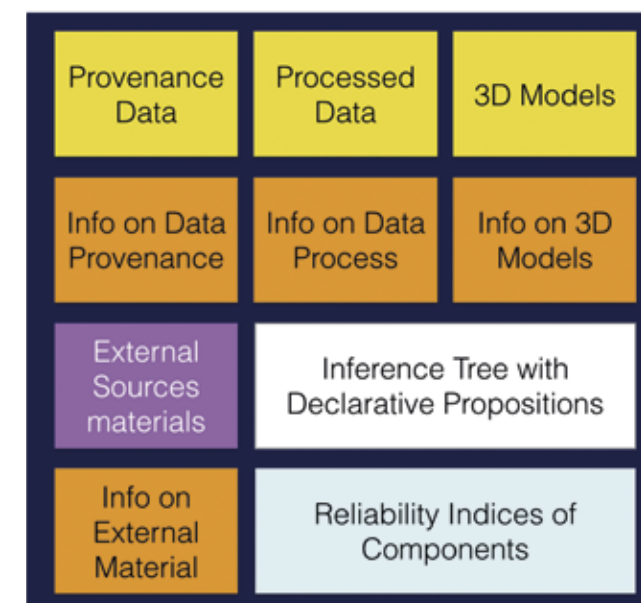


Fig. 1.
Schematic diagram of the proposed repository of 3D digital data

chaeology, as the integration of qualitative and quantitative research, where we look at the meaning of concepts, the measurement of variables and the visual investigation of processed data. The reasoning process, i.e. how we reached a certain conclusion, must be clearly stated and a formal relation to the 3D outcome must be formulated (Hermon 2012; Hermon 2008). Therefore, a fundamental step (as in any scientific based methodology) is the formulation of the “hypothesis”, i.e. the suggested explanation of a phenomenon. We suggest to build a “logical framework” for such explanation, based on concepts deriving from Jean Claude Gardin's works, namely the logicist approach for formally described archaeological reasoning (Gardin 2002a). Basic steps are the creation of a database (a set of declarative propositions and an inference tree describing the relationships between propositions, by “IF” – “THEN” sets (Gardin 2002b). These are in turn linked to the 3D components stored into a repository, each with its own “reliability index” (Hermon et al. 2006) and the related declarative propositions and observations.

A “3D reasoning platform” is thus created (Damjanovic, Hermon 2013), where hypotheses can be tested, validated or rejected through a visual analysis process, as well as a metrical one, based on pre-defined variables and their related sets of values. Its basic components are: a digital repository where data is stored with its metadata and CIDOC-CRM (<http://www.cidoc-crm.org>) descriptions, the logicist framework (with its inference tree, propositions and related relationships – these being linked to components stored in the repository) and the reliability layer, assigned to each of the above components, linked to an uncertainty threshold for visualisation matter (fig. 1).

Example

The archaeological site of Santa Cristina, Sardinia, Italy (fig. 2) is known as a “sacred well complex” (Atzeni 1977), one among ca. two dozen sites on the island exhibiting similar architecture and features. Even though the site appears in various guides and the very few



Fig. 2.
The “sacred-well” complex of the Santa Cristina archaeological site

archaeological publications as a “sacred well”, implying that a form of ritual was performed there, there is no firm evidence to support such a claim, neither by its (meagre) finds nor by historical sources, or analogies to other similar structures.

Recently, its architectural remains were 3D documented (fig. 3), which served for an extensive analysis on the construction methods of the place (Atzeni 2013) and the publication, for the first time, of a systematic plan, sections and 3D model of the “sacred well” (Vico et al. 2015). The structure has several distinct components: a surrounding elliptical enclosure (a), an inner structure keyhole shaped (b), with a bench along its semi-circle (c), the stair leading to the underground chamber (d) and a “tholos”-like underground shaft built on top of the underground chamber (e). Walls are preserved at a maximum height of one meter, and there is no information on their original height or the roofing.

Comparison with other “sacred-well” structures

A rough comparison between other structures known as “sacred wells” (fig. 4) shows that many follow the same general concept of a keyhole shaped structure with an underground space, where water is available. However, Santa Cristina stands as a unique case where the above ground walls are not connected to the underground stairs and the tholos, lacking any direct contact points, as in all other examples, where in some cases the tholos and the walls of the keyhole structure form one continuous wall.

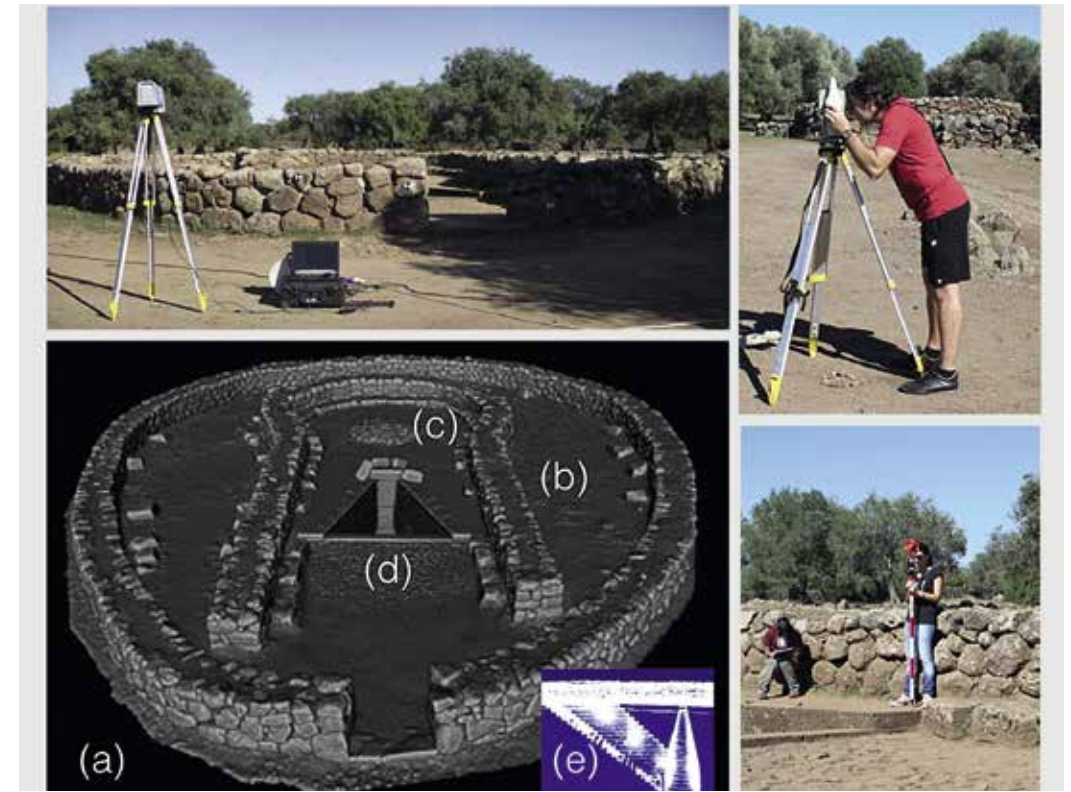


Fig. 3.
3D documentation at the site and resulted 3D model

The case of the Santa Vittoria, Serri, is exemplary: there is a clear separation between the surrounding wall and the inner structure, limiting access to the stairs and the underground tholos, with a limited area in front of the stairs (delineated by the outer enclosure) available for human activity. The same situation was noted at other sites (e.g. Sa Testa, Olbia, Funtana Coberta) but NOT at Santa Cristina, where the area delimited by the outer enclosure and the stairs leading to the underground space is very small). Another major discrepancy between Santa Cristina and most of the other compared structures is that the former lacks any features (carved in bedrock, or built from stone) that would indicate a ceremonial ritual. Such features exist in most of the other cases, either as narrow canals, basins or decorative elements along the walls.

A visual comparison between structures known as “sacred wells” shows that there were no strict canons, rules or norms on how to build them, the compared sites displaying a general trend that was followed, where an underground structure (cylindrical or “tholos”-like), usually well-carved, is accessed through stairs, while above ground a keyhole structure is visible, sometimes surrounded by an enclosure, with or without an open space (yard) in front of the stairs, delimited by the outer wall. This leads to the conclusions that while in some cases a “crowd” may have been present in a dedicated space (the so-called “yard”), in others human activity was limited to the underground space, which can host two-three persons at a time.

The 3D reasoning process

A 3D digital reconstruction of the Santa Cristina sacred well complex is being currently carried out (quote). Its aim is to better understand the social actions that took place at the site and how these may have influenced the architecture of the complex. The reasoning process and the choices made when building the 3D model are detailed in the consequent inference tree. The guiding assumption is that some kind of human action beyond the mundane took place at the site, with an apparent ceremonial aspect. Such an activity, (at least for a certain extent) occurred within the physical space delineated by the walls of the analysed structure. Thus, there are some physical constraints on the social action performed inside the structure. In other words, the social action requires certain prerequisites from the structure. Let's examine separately each distinct component of the structure.

The external enclosure was probably built to delimit the extension of the ritual area. Its walls may have raised higher than today, but there was no roofing, given the following facts:

- (a) the preserved walls are too thin to support a massive upper construction
- (b) there are no archaeological evidences for the presence of columns
- (c) there are no evidences for architrave use in roofing structures on the island, during the relevant period.

Therefore, the possible constraints that dictated the original height of the external wall were:

- (a) symbolic – delineation of the ritual area (separate the “in” from the “out”)
- (b) tradition – this is how such structures were built, with a meaning “lost in time”
- (c) ritual function – to hide the view from outside (less plausible, since also the internal component has a wall by itself)
- (d) it served to protect the internal area from strong winds, water floods, landslides, etc. (remote possibility, given the fact that the area usually does not experience such events).

We are left then with a wall with a possible height that can vary between ca. 1 meters (options (a), (b)) to ca. 2–3 meters (options (c), (d)), probably built with the same raw materials and using the same technique as the wall visible today. No mortar or any other covering material is visible today; there is no reason to assume that the situation was different in the past, since such a method does not appear in any structure from the same period.

Since there are no comparative evidences, no historic records and the archaeological remains are unclear (the condition of the site at the moment of its discovery is unknown, since no excavation reports have ever been published), each option has similar reliability indices. The width of the preserved wall may have supported an overall height of 2–3 meters; given the fact that the area is relatively well protected against strong winds, floods, etc., option (c) has a higher reliability index than others (fig. 4).

The situation is more complex regarding the internal (keyhole) structure. Several inferences can be formulated. These may help elucidate the question of its roofing / internal lightening / ventilation.

(a) There were no activities performed inside the inner structure, which took place along the stairs or at the bottom of the tholos. This is in slight contradiction to the presence of a row of stones (bench?) along the curved part of the inner structure.

(b) The presence of a “bench” along the curved wall of the inner structure suggests that some kind of human activity took place there, either for:

1. depositing goods along the “bench” – in this case people would access the area, deposit the goods and leave it.
2. sitting along the “bench” as part of a ritual – in this case, a maximum of 10 people could sit on it, or ca. 20 persons stand in the open space in front of it.

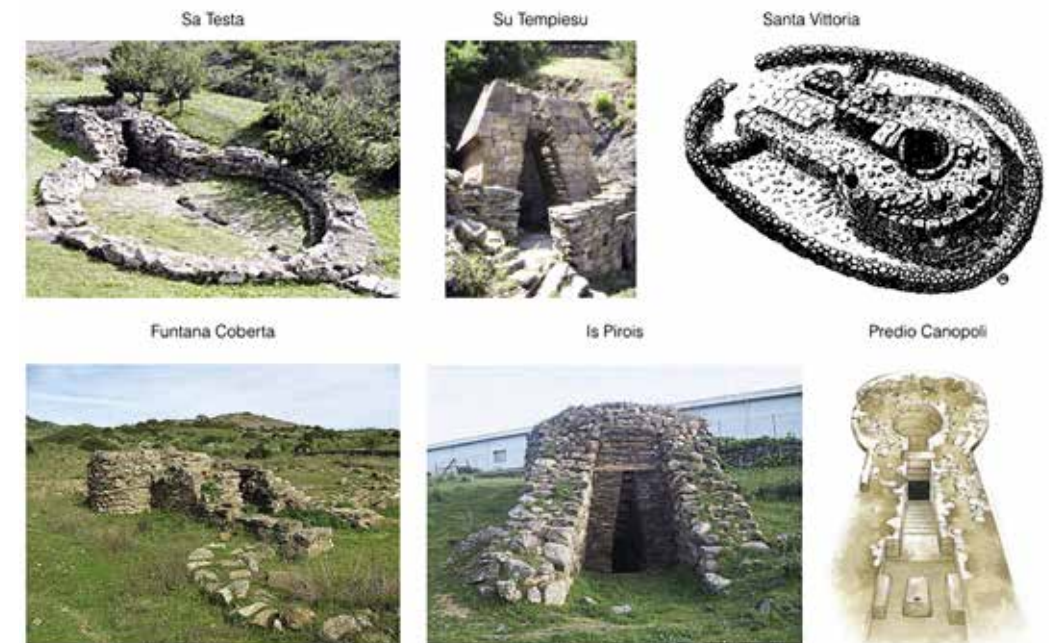


Fig. 4.
Comparative structures in Sardinia

If option (a) is the correct one, access to the stairs and its related underground space was done directly from the opening of the external enclosure, probably without any gate (no signs of it on the floor or the entrance walls). If the activities took place during day light, the geometry of the structure allowed enough natural light to reach the bottom of the underground structure and the use of artificial lights (torches, candles, lamps) was not functional, but probably related to the social activities performed there. The presence of windows cannot be certified, if there were, these reflected choices beyond the functional.

If option (b) is the correct one, several questions must be solved, mainly regarding light and ventilation, accessibility and connection between the various components of the inner structure, which in turn relate to the shape and structure of the roofing. This option proposes also a drastic shift in the location of the “gathering area” from the front of the stairs (as in all other cases of “sacred well” sites on the island, where an outer enclosure delineates a “yard” in front of the stairs) to its back. It also requires rather complicated architectural solutions which must address the issues of connecting between the straight walls of the inner structure with its curved part (the keyhole shape), while in the same time providing access to circular space. Such an architectural answer must also take into consideration several constraints, discussed in detail elsewhere (Vico et al. 2015). These are either conceptual, related to the builders’ knowledge, techniques and technology involved, or physical (construction material, its availability, geology of the area, climate conditions, etc.).

Given the estimated resistance of the building material and considering the shape of the analysed structure, natural forces potentially active in the area (e.g. wind, weight of possible snow) and the allowed walls tension, the overall height of the inner structure

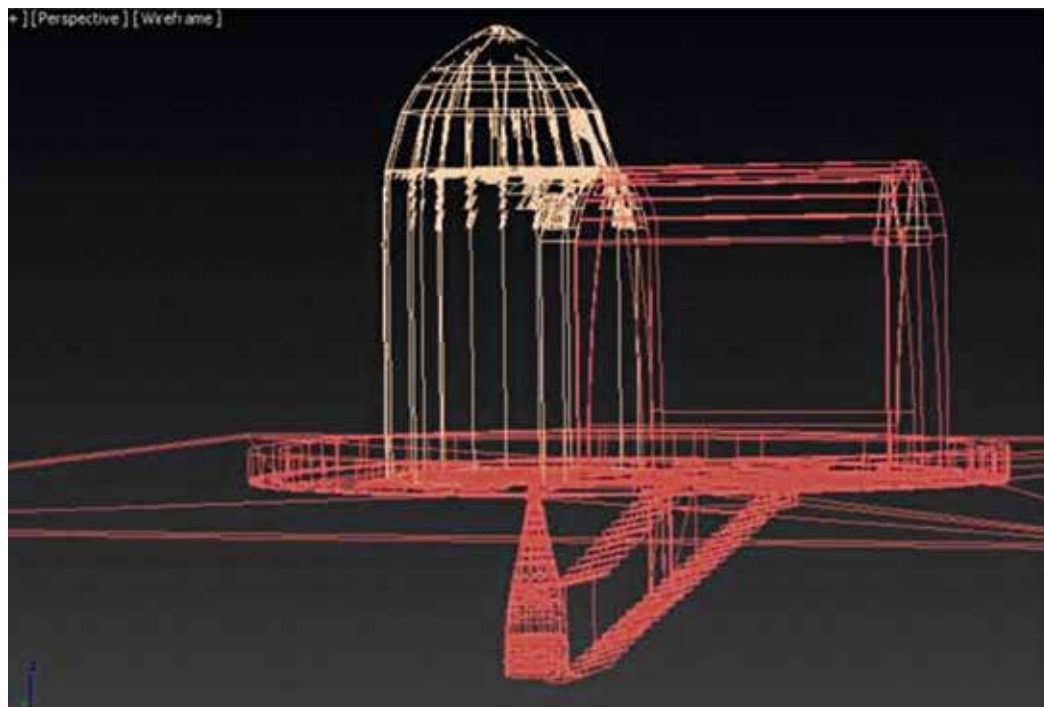


Fig. 5.
Schematic 3D digital reconstruction of the structure

(covering the curved keyhole area) could vary between 7–11 meters. The question of roofing requires some further analysis. One option is shown in Figure 5. The straight walls of the inner structure (fig. 6) could have held an upper construction that would converge into a false vault (corbel arch style) at a height of ca. 9 meters. Following similar estimates, the rounded walls of the inner structure would converge into a false vault at a height of ca. 14 meters. However, the solution of two false vaults is problematic, given the architectural challenges builders had to face when connecting between the two parts (Vico et al. 2015).

Light and ventilation would have been available either through the entrance or through a hole left open at the top of the false vault. Access to the vaulted area was along the sides of the straight wall. The attachment between the straight lined walls and the curved area could have been obtained by a corridor covered by a roof supported by a lintel (fig. 7). Another option for roofing is a flat roof, made of long wooden beams laid on the straight lined walls of the keyhole structure. Available trees with corresponding heights (junipers) were probably available for cutting in the past, in the forests covering the hills surrounding the site. Even though no physical remains can prove this supposition, the choice for a flat roof, built by wooden beams cannot be excluded, given its relatively low energy investment in its construction and the availability of raw materials (trees) in the vicinity of the site. The supporting walls would rise to ca. 2 meters high and the beams could have been covered with reed. Given the massive investment in the overall details of the entire construction, the preference for using stones in building non-habitation structures in the given period, the solution of a flat wooden beams roof will have a low reliability index.

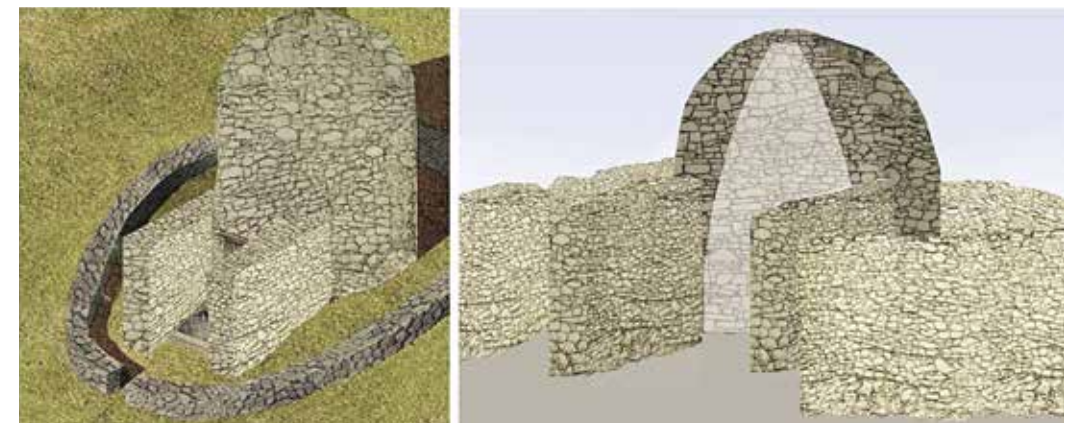
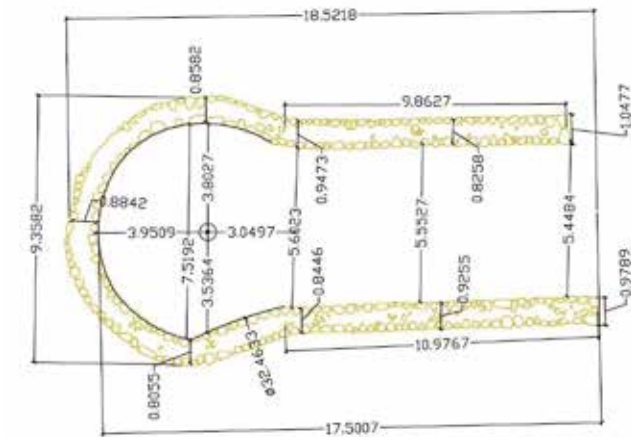


Fig. 6.
Detailed measurements of the structure
Fig. 7.
3D digital models of the structure

Conclusions

The paper presented a first attempt on setting the foundation for a 3D based research methodology in archaeology, detailing its theoretical and implementation aspects through a concrete case-study. At the theoretical level, the methodology relies on concepts deriving from the “logicist” approach, proposed some two decades ago by Gardin (see above). It is aligned with requirements formulated in related international charters (e.g. The London Charter) and addresses challenges posed by “provenance data”, “transparency of research” and “formal representation of a reasoning process”. It also offers a concrete implementation solution, based on a digital repository where data is archived through a detailed metadata schema capturing all aspects of the stored digital object, while its semantic interoperability is assured by a layer of CIDOC-CRM description. Each digital object is thus described through metadata, CIDOC-CRM, its position within the logicist-based inference tree and its reliability index.

The paper also demonstrated how 3D modelling is a valid approach for solving challenging research questions in archaeology. It also emphasised the importance of properly documenting archaeological excavations and having such records available for further research, organised in repositories with open-access.

References

Atzeni 1977

Atzeni E. Santuario nuragico di Santa Cristina (Paulilatino) // *Rivista di Scienze Preistoriche* 2. 1977. Pp. 357–359.

Atzeni 2013

Atzeni I. Dal modello 3D all'analisi archeologica. Il caso del tempio a pozzo di Santa Cristina di Paulilatino. Specialisation thesis. Università degli Studi di Sassari, 2013 (unpublished).

Barceló 2009

Barceló J.A. The birth and historical development of computational intelligence applications in archaeology // *Archeologia e Calcolatori* 20. 2009. Pp. 95–109.

Buck et al. 1996

Buck C.E., Cavanagh W.G., Litton C.D. Bayesian Approach to Interpreting Archaeological Data. Chichester : Wiley, 1996.

Contreras et al. 2013

Contreras F., Farjas M., Melero F.J. (eds.). Fusion of Cultures. Proceedings of the 38th Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, Granada, Spain. BAR International Series 2494. Oxford : Archaeopress, 2013.

Contu 1999

Contu E. Pozzi sacri. Ipotesi ricostruttive. Sacer: Bollettino della Associazione Storica Sassarese 6. 1999. Pp. 125–148.

Damjanovic et al. 2013

Damjanovic U., Hermon S., Iannone G. Documentation of decision-making process in the analysis of digital heritage objects / in A. Addison, G. Guidi, L. De Luca, S. Pescarin (eds.). Digital Heritage International Congress. IEEE. Vol. I. Marseille, 2013. Pp. 743–746.

Evans, Daly 2006

Evans T.L., Daly P.T. (eds.). Digital Archaeology: Bridging Method and Theory. Psychology Press, 2006.

Felicetti, Niccolucci 2011

Felicetti A., Niccolucci F. A repository for heterogeneous and complex digital cultural objects. Proceedings of the 12th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST. Eurographics Association, 2011. Pp. 81–87.

Forte 1997

Forte M. (ed.). Virtual Archaeology: Great Discoveries Brought to Life through Virtual Reality. London : Thames and Hudson, 1997.

Forte 2010

Forte M. (ed.). Cyber-Archaeology // BAR International Series 2177. Oxford : Archaeopress, 2010.

Gardin 2002a

Gardin J.C. Archaeological discourse, conceptual modelling and digitalisation: an interim report of the logicist program / M. Doerr, A. Sarris (eds.). The Digital Heritage of Archaeology, CAA 2002. Greece : Hellenic Ministry of Culture, 2002. Pp. 5–11.

Gardin 2002b

Gardin J.C. (2002b). The logicist analysis of explanatory theories in archaeology / R. Franck (ed.). The Explanatory Power of Models. Methodos Series Vol. 1. Netherlands : Springer, 2002. Pp. 267–284.

Hermon 2008

Hermon S. Reasoning in 3D: a critical appraisal of the role of 3D modelling and virtual reconstructions in archaeology // B. Frischer, A. Dakouri-Hild (eds.). Beyond Illustration: 2D and 3D Technologies as Tools for Discovery in Archaeology. BAR International Series 1805. Oxford : Archaeopress, 2008. Pp. 36–45.

Hermon 2012

Hermon S. Scientific method, chaîne opératoire and visualization – 3D modelling as a research tool in archaeology // R. Beacham, H. Denard (eds.). Paradata and Transparency in Virtual Heritage. London : Ashgate, 2012. Pp. 13–22.

Hermon et al. 2012

Hermon S., Amico N., Iannone G., Khalayli M., Milewski I., Getzov N. Archaeological field documentation and architectonic analysis – a 3D approach, Ein Zippori as study case. The 13th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST 2012. The Eurographics Association, 2012. Pp. 113–119.

Hermon, Nikodem 2008

Hermon S., Nikodem J. 3D modelling as scientific research tool // A. Posluschny, K. Lambers, I. Herzog (eds.). Layers of Perception, CAA 2007. Kolloquien zur Vor- und Frühgeschichte. Bonn, 2008. Vol. 10. (CD-Rom).

Hermon et al. 2006

Hermon S., Nikodem J., Perlingieri C. Deconstructing the VR – data transparency, quantified uncertainty and reliability of 3D models / M. Ioannides, D. Arnold, F. Nicclucci, K. Mania (eds.). The e-Documentation of Cultural Heritage, VAST 2006. Eurographics Association, 2006. Pp. 123–129.

Hibert, López 2011

Hilbert M., López P. The world's technological capacity to store, communicate, and compute information. *Science* 332. 2011. Pp. 60–65.

Iannone et al. 2011

Iannone G., Georgiou R., Amico N., Ronzino R., Hermon S., Karageorghis V., Pilides D. Ancient vase 3D reconstruction and visualization. Revive the Past, Proceedings of the 39th Conference on Applications and Quantitative Methods in Archaeology, CAA 2011. Amsterdam : Pallas Publications, 2011. Pp. 59–64.

Kampel, Sablatnig 2001

Kampel M., Sablatnig R. Automated 3D recording of archaeological pottery. ICHIM 1. 2001. Pp. 169–182.

Karasik, Smilansky 2011

Karasik A., Smilansky U. Computerized morphological classification of ceramics // Journal of Archaeological Science 38(10). 2011. Pp. 2644–2657.

Katsianis et al. 2008

Katsianis M., Tshipidis S., Kotsakis K., Kousoulakou A. A 3D digital workflow for archaeological intra-site research using GIS // Journal of Archaeological Science 35(3). 2011. Pp. 655–667.

Larue et al. 2012

Larue F., Di Benedetto M., Dellepiane M., Scopigno R. From the digitization of cultural artifacts to the Web publishing of digital 3D collections: an automatic pipeline for knowledge sharing // Journal of Multimedia 7(2). 2012. Pp. 132–144.

Lemonnier 1986

Lemonnier P. Topsy turvy techniques. Remarks on the social representation of techniques // Archaeological Review of Cambridge 9. 1986. Pp. 27–37.

Lilliu 1958

Lilliu G. Nuovi templi a pozzo della Sardegna nuragica. Studi Sardi XIV–XV. 1958. Pp. 197–288.

Mingquan et al. 2012

Mingquan Z., Romanowska I., Wu Z., Xu P., Verhagen P. (eds.). Revive the Past. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Proceedings of the 39th International Conference. Amsterdam : Pallas Publications, 2012.

Mueller et al. 2004

Mueller P., Vereenoghe T., Vergauwen M., Van Gool L., Waelkens M. Photo-realistic and Detailed 3D Modeling: the Antonine Nymphaeum at Sagalassos (Turkey). 2004. Available: ftp://ftp.vision.ee.ethz.ch/publications/proceedings/eth_biwi_00300.pdf. Accessed 4 February 2015.

Mueller 2007

Mueller P. Applied procedural modeling // ACM SIGGRAPH 2007 Courses. 2007. Pp. 112–147.

Niccolucci, Hermon 2002

Niccolucci F., Hermon, S. Multimedia Communication for Cultural Heritage. Budapest : Archaeolingua, 2002.

Niccolucci, Hermon 2010

Niccolucci F., Hermon S. A fuzzy logic approach to reliability in archaeological virtual reconstruction / F. Niccolucci, S. Hermon (eds.). Beyond the Artifact – Digital Interpretation of the Past, CAA 2004. Budapest : Archaeolingua, 2010. Pp. 26–33.

Pitzalis et al. 2010

Pitzalis D., Niccolucci F., Theodoriou M., Doerr M. LIDO and CRM dig from a 3D cultural heritage documentation perspective. Proceedings of the 11th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology, and Cultural Heritage, VAST. Eurographics Association, 2010. Pp. 87–95.

Reilly 1992

Reilly P. Three-dimensional modelling and primary archaeological data // P. Reilly, S. Rahtz (eds.). Archaeology and the Information Age. London : Routledge, 1992. Pp. 147–173.

Ronzino et al. 2012

Ronzino P., Hermon S., Niccolucci F. A metadata schema for cultural heritage documentation // V. Capellini (ed.). Electronic Imaging & the Visual Arts: EVA 2012. Firenze: Firenze University Press, 2012. Pp. 36–41.

Rossignac, Borrel 1993

Rossignac J., Borrel P. Multi-resolution 3D approximations for rendering complex scenes // B. Falcidieno, T.L. Kunii (eds.). Geometric Modeling in Computer Graphics. Springer Verlag, 1993. Pp. 455–465.

Sanders 1999

Sanders D.H. Virtual worlds for archaeological research and education / in L. Dingwall, S. Exon, V. Gaffney, S. Laflin, M. Van Leusen (eds.). Archaeology in the Age of the Internet CAA 1997. BAR International Series 750. Oxford, 1999. P. 265 and CD_ROM.

Shao, Terzopoulos 2006

Shao W., Terzopoulos D. Populating reconstructed archaeological sites with autonomous virtual humans. Intelligent Virtual Agents 6th International Conference. Berlin : Springer, 2006. Pp. 420–433.

Silberman 2004

Silberman N.A. Beyond theme parks and digitized data: what can cultural heritage technologies contribute to the public understanding of the past? / in K. Cain, Y. Chrysanthou, F. Niccolucci, D. Pletinckx, N. Silberman (eds.). Interdisciplinarity or The Best of Both Worlds The Grand Challenge for Cultural Heritage Informatics in the 21st Century. Budapest: Archaeolingua, 2004. Pp. 9–12.

Vico et al. 2015

Vico L., Atzeni I., Hermon S., Depalmas A., Iannone G. Métodos para la reconstrucción virtual de construcciones históricas. El caso de estudio de Santa Cristina de Paulilatino. Virtual Archaeology Review. TBA, 2015.

I. Liritzis
P. Volonakis
S. Vosinakis
University of the Aegean, Rhodes, Greece

G. Pavlidis
Research Center ATHENA, Greece

CYBER-ARCHAEOMETRY FROM CYBER-ARCHAEOLOGY: NEW DYNAMIC TRENDS IN ARCHAEOMETRIC TRAINING AND RESEARCH

A modern approach to cultural education and archaeological sciences is presented with the use of new technologies: from virtual archaeology in cyber-archaeology and cyber-archaeometry. Virtual archaeology is mainly visual, static, with graphics and orientated to photorealism (Reilly 1990). Recently, new approaches have been added using various interactive practice. The 3D modeling is a very useful practice for the identification, monitoring, conservation, restoration and enhancement of archaeological objects. In this context the 3D computer graphics can support archaeology and heritage policy, offering scholars a "sixth sense" for the understanding of the past, as it allows them almost to live it. CA is the digital management of much partial information in the field. It is not necessarily visual, but dynamic, interactive, complex, autopoietic (self-organized) (Maturana, Varela 1980) and not necessarily oriented to photorealism. The past cannot be remade, but could be simulated. The CA is the process of simulation and reconstruction of archaeological finds or cultural materials. The archaeology of the third millennium is able to process, interpret and transmit much more data and information relative to the last two centuries. Cyber-archaeometry (Cam) is the digital IT process of simulation, restructuring and management of archaeometric processes from the field of natural sciences in relation to material culture, investigated variously (dating, prospection, analysis, technology, provenance, archaeoastronomy, etc.), either as optimum recruited image or as targeted research quest (Liritzis 2014). For example, the representation of the hydration process of obsidian in a nanoscale is first pre-educational in order to understand the mechanism of hydration on several sources of obsidian from different environments through an optical language. The 3D cyber-presentation of dating with obsidian hydration essentially planning the network of interpretation codes (mathematics: algorithms, equations) and the diffusion time, otherwise it is misunderstood in a linear sequence (spatial, temporal or oral presentation). If this cyber era is seen as a retrospective concept, one has to compare the two approaches in the development of digital archaeometry from archaeological procedural (processualism) in post-procedural thinking, in order to achieve the analysis of hybrid forms of both approaches, achieved by procedural tools (statistical analysis and quantitative methods in different fields, mathematics,



Fig.1.
Full online demonstration of optical polarised microscope and mineral identification.

geography, archaeometry, anthropology, archaeology and related disciplines). The above is an example of the emergence of cyber-archaeometry.

Virtual Environment, VE; Virtual Reality, VR; Massively Multiplayer Online World MMOW (Virtual Worlds); Augmented Reality, AR; immersive archaeology, Gamification and Serious Games are animation or 3D representations as simulated or real-time images with strong applications in cultural assets.

A first contact with cyber-archaeometry has started with the simulation of a petrographic (optical) microscope with the use of avatar in the time-space frame of the laboratory, and we navigate, explore, control the learning outcomes in connection to the archaeometric multisystem work.

3D virtual lab – educational aims – anticipated results

- Execution of laboratory exercises from internet via browser;
- making a virtual lab for education of university students (e-learning or from distance) without physical presence;
- learning the functioning of lab instruments for archaeometric work;
- enabling students to discover knowledge through these processes, but also to interpret in their own way the laboratory results.

Ongoing example

- 3D simulation of water diffusion phenomenon in amorphous glass (obsidian);
- from Fick's law to the dynamic molecular physico-chemistry in the time-space domain;
- from the empirical to phenomenological and the scientific model of diffusion mechanism in the hydration dating method of obsidian.

Some benefits in training on a virtual environment

- Taking place any time without help from assistants of the lab;
- cost savings;
- avoiding disasters and loss of material;
- it can be repeated many times;

- partial steps can be repeated, giving students the opportunity to analyze the process from different perspectives and opinions.

The development of the application is made with the 3D Modeling and Game Engine Unity3D as well as on purpose designed algorithms.

Learning outcome for the optical microscope

- Recognizing content of thin sections (minerals, organic matter, scrap fragments, mineralogical structures etc);
- wide spectrum of archaeo-materials;
- trial & error;
- targets: analytical reflection;
- functioning of equipment;
- familiarization;
- synergy, teamwork, understanding.

References

Anderson et al. 2009

Anderson E. et al. Serious games in cultural heritage. Proceedings of the 10th VAST Int'l Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage – STARs Session, Eurographics. Malta, 22–25 September 2009. Pp. 29–48.

Bell 2008

Bell M. Toward a definition of “virtual worlds” // Journal of Virtual Worlds Research. 2008. Pp. 1–5.

Forte 2010

Forte M. Cyber Archaeology. BAR International Series 2177. Oxford : Archaeopress, 2010.

Levy 2013

Levy T.E. Cyber-archaeology and world cultural heritage: insights from the Holy Land. Bulletin of the American Academy of Arts & Sciences LXVI. 2013. Pp. 26–33.

Levy 2014

Levy T.E. (ed.). Near Eastern Archaeology. Special Issue on Cyber Archaeology 77. 2014.

Liritzis 2014

Liritzis I. Cyber-Archaeometry. 2014 (in press).

Maturana, Varela 1980

Maturana H., Varela F. Autopoiesis and cognition: the realization of the living. Boston Studies in the Philosophy of Science. Vol. 42. 1980.

O’Neil, Perez 2006

O’Neil H.F., Perez R.S. (eds.). Web-Based Learning: Theory, Research and Practice. Erlbaum, Mahwah, NJ, 2006.

Reilly 1990

Reilly P. Towards a Virtual Archaeology. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. BAR International Series 565. Oxford : Archaeopress, 1990.

В. М. Иванов, С. В. Стрелков, А. А. Холина, А. Л. Автюшенко

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия

ВИРТУАЛЬНЫЕ РЕКОНСТРУКЦИИ В МУЛЬТИМЕДИЙНЫХ ЭКСПОЗИЦИЯХ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

Понятие «реконструкция» имеет несколько значений. Чаще всего речь идёт о восстановлении чего-либо по сохранившимся остаткам или описаниям (Ожегов, Шведова 1997). Но в исторической реконструкции принято рассматривать это понятие в более широком смысле, а не только как воссоздание первоначального облика старинных, порой утраченных предметов. Историческая реконструкция с подобной точки зрения – это представление цельной картины мира глазами человека исследуемой эпохи. Можно даже сказать, что это научная работа по воссозданию предметов старины на основе имеющихся достоверных источников.

Одним из основных инструментов реконструкции является историческое моделирование. В него входит изучение всего комплекса источников по моделируемой эпохе. Таким образом, историческое моделирование – это создание комплекса методик и мероприятий, позволяющих восстановить целостную, не противоречащую известным фактам картину жизни (модель) как отдельного человека, так и общества в определённой местности и в определённую эпоху (Фищев 2010).

В настоящее время виртуальные реконструкции широко применяются для визуализации данных, полученных в результате исторического моделирования. Технология трёхмерного моделирования применяется в архитектуре уже почти 15 лет. В научно-исследовательской деятельности реконструкции используются для изучения утраченных либо частично разрушенных памятников, а также для воссоздания исторических событий (Киссель, Потапенко 2008).

На кафедре «Инженерная графика и дизайн» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета на базе методик исторического моделирования создаются как трёхмерные модели отдельных памятников архитектуры, так и целые исторические ансамбли различных исторических эпох.

В данной работе представлен ряд проектов, выполненных студентами и выпускниками кафедры и посвящённых задачам сохранения культурного наследия.

Первый проект – мультимедийное сопровождение экспозиции «Ожившая археология». Работа была выполнена для Большого Меншиковского дворца в Ораниенбауме и предполагала воссоздание с помощью трёхмерной графики и анимации археологических объектов на основе сохранившихся фрагментов и исторических свидетельств. В проект было включено 10 исторических объектов, облик и окружение которых необходимо было смоделировать, показав связь между фрагментами, исходными объектами и историческими интерьерами, в которых они находились. Проект был воплощён в виде пятиминутного анимационного видеоролика, разделённого на десять частей. Каждая часть была посвящена одному историческому объекту: вначале демонстрировались сохранившиеся детали объекта с их кратким описанием, далее визуализировался процесс восстановления объекта средствами трёхмерной



Рис. 1.
Фрагмент трубки курительной
Рис. 2.
Реконструкция первоначального вида

графики и, наконец, восстановленный объект интегрировался в интерьер требуемой эпохи. В качестве примера можно привести фрагмент голландской курительной трубки XVIII века, найденной во время археологических раскопок на территории дворца. Посетитель экспозиции имел возможность восстановить историю данного фрагмента, сначала изучив оставшиеся обломки трубки (рис. 1), далее проследив процесс их воссоединения и формирования исконного объекта (рис. 2) и в конце просмотреть отрывок визуализации, где виртуальный курительный аксессуар был полностью восстановлен и находился в руках у мужчины, изображённого на художественном полотне XVIII века.

Для наглядной демонстрации облика воссозданных объектов были созданы открытки с зашифрованными графическими кодами (рис. 3), позволяющие рассмотреть объект с помощью технологии дополненной реальности. Данная технология даёт возможность пользователю с помощью камеры практически любого мобильного устройства «считать» графический код объекта и получить его трёхмерное изображение на

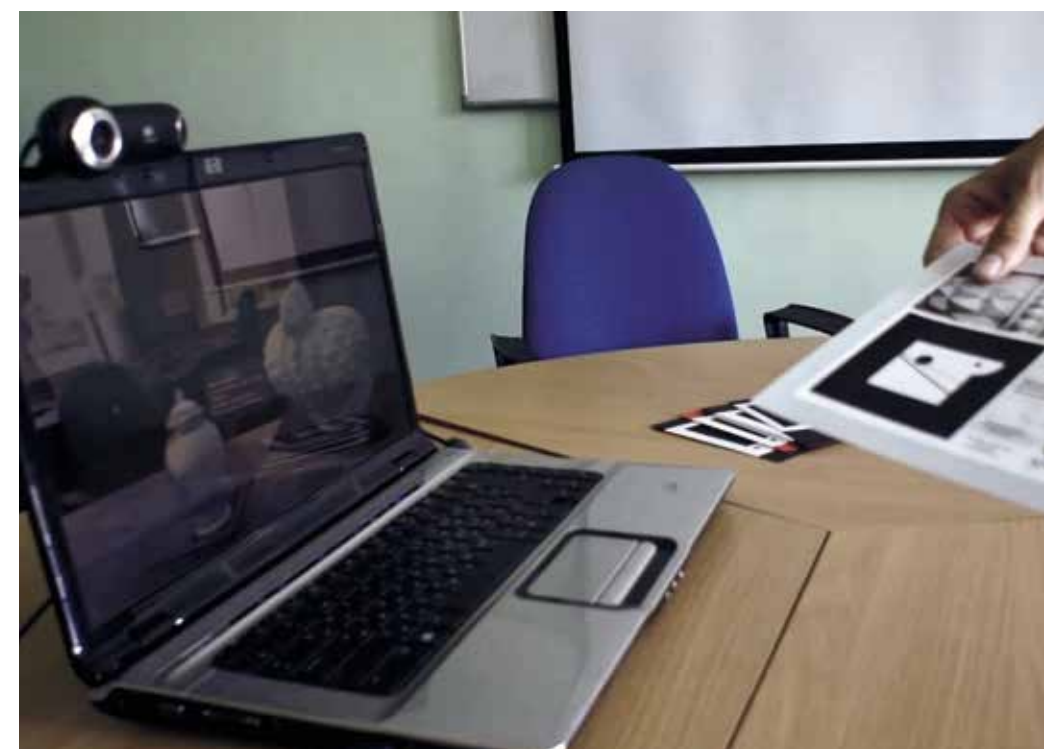


Рис. 3.
Вид открытки с кодом
Рис. 4.
Процесс работы технологии дополненной реальности



Рис. 5.
Результат раскопок фонтана «Пирамида»

устройстве. Владелец устройства также имеет возможность производить простейшие манипуляции с виртуальным реконструированным объектом – вращать и перемещать его в виртуальном пространстве (рис. 4). Реалистичность визуализации объекта и быстрота отклика позволяют создать ощущение реального взаимодействия с объектом.

Кроме того, частью инсталляции стала созданная в музее и сопровождающая видеоряд экспозиция. Демонстрируемые в видеоролике десять объектов раскопок были размещены в одном помещении, видеоизображение проецировалось таким образом, что каждый из объектов подсвечивался в тот момент, когда в виртуальном видеоряде появлялся рассказ о данном фрагменте (фрагментах). Такую работу можно охарактеризовать термином «архитектурная визуализация» – воссоздание частично или полностью утраченного облика памятника, реконструкция которого в натуре невозможна.

Следующий проект лаборатории – поэтапная реконструкция Летнего сада.

К открытию Летнего сада после реконструкции был создан мультимедийный видеоролик, показывающий, как происходили археологические раскопки и проводилась реконструкция объектов Летнего сада. Это позволило наглядно представить основные этапы восстановления первоначального облика сада. В видеоролике демонстрировались полученные в ходе археологических исследований объекты раскопок – фрагменты не сохранившихся фундаментов исторических сооружений Летнего сада (рис. 5). Данные объекты анализировались специалистами, которые реконструировали облик несохранившихся зданий или фонтанов. Исследовался также графиче-



Рис. 6.
Процесс реконструкции

ческий и текстовый материал ушедшей эпохи, формировался набор характеристик объекта (чертежи и изображения), по которым художники трёхмерной графики затем виртуально реконструировали исторический объект. Затем был показан действительный ход реальной реконструкции – консервация остатков фундамента под слоем почвы. Этот этап был необходим с целью сохранения ценного артефакта для исследователей следующих поколений, которым, возможно, потребуются данные об объекте в их исходном виде. Далее демонстрировалось создание нового фундамента по чертежам, полученным в ходе исторических изысканий, и прокладка труб для системы подачи воды (если объект являлся фонтаном).

Также была сделана анимация облицовки фонтанов плиткой (рис. 6), а в случае со зданиями – установки оконных рам, дверных проёмов и т. п. На заключительном этапе демонстрировалась анимация струй воды у фонтанов, а сам фонтан органично вписывался в экстерьер Летнего сада (рис. 7). Таким образом, зрителю предлагалось совершить своеобразную виртуальную прогулку по саду. В статье О. М. Киссель данный проект относится к PR-деятельности музеев. Автор подчёркивает, что основная цель в этом случае – организовать общественное обсуждение проектов, связанных с изменениями городской среды, привлечь партнёров и спонсоров (Киссель, Потенко 2008).

В целях усовершенствования методик визуализации и демонстрации объектов культурно-исторического наследия сотрудниками кафедры была разработана технология создания точных 3D-моделей исторических объектов на основе фотографий. С помощью этой технологии можно с минимальными затратами (имея только



Рис. 7.
Вид фонтана «Пирамида» в Летнем саду

фотоаппарат и дополнительный источник света) создать 3D-модель любого объекта размером 3 x 3 м. Данная технология основана на фотограмметрии – новом методе получения и представления пространственной информации об объектах. Фотограмметрические модели (иначе, «измерительные 3D-модели») и сама технология дают возможность интерпретации пространственной информации в заданной системе координат и измерения координат отдельных точек этой модели (Павленко 2006). Пространственную информацию об объектах можно получить различными способами – лазерным сканированием, физическими измерениями и т.д., но эти способы финансово затратные и требуют зачастую более габаритной техники и большего количества времени на замеры. Таким образом, наиболее полную и оперативную информацию для создания 3D-моделей можно получить в результате фотограмметрической обработки снимков.

Необходимо отметить, что технология фотограмметрии разработана давно и описана в литературе, однако руководствуясь указанными в подобной литературе схемами, невозможно получить высоко детализированный снимок. Как правило, растровые изображения используются в компьютерной графике для создания поверхностей ландшафтов: например, метод Displacement (смещение) заключается в изменении топологии трёхмерного объекта в соответствии с двухмерной картой высот, выполненной в градациях серого. Применительно к исторической науке получаемые трёхмерные объекты должны соответствовать оригиналу и отображать его особенности. Поэтому ещё одним направлением исследований стал поиск дополнительной технологии, которая позволила бы наиболее точно и полно фиксировать геометрию архитектурного объекта с возможностью передачи цветовых характеристик артефакта. Такая технология была реализована с помощью карт нормалей.

Разработанная технология опирается на набор различных программных продуктов, основным из которых является сервис компании Autodesk под названием 123D



Рис. 8.
Процесс создания 3D-модели объекта на основе фотографий

Catch. Он позволяет в автоматическом режиме построить 3D-модель объекта по набору фотоизображений (Сканируем в 3D 2011).

Объект, с которого необходимо получить виртуальную копию, размещается на однотонной (желательно контрастной по цвету) поверхности. При этом необходимо подготовить материалы фона и подложки должным образом, ведь от этого зависит дальнейший результат и интерпретация полученных фотоснимков программными продуктами. Далее выставляется свет, и с помощью фотоаппарата на штативе с различных точек производится фотосъёмка объекта. Как правило, достаточно фотографий с четырёх ракурсов. Если объект имеет специфическую форму, то могут потребоваться дополнительные снимки. На следующем этапе полученные фотоснимки подгружаются в программный продукт, который самостоятельно определяет связи между изображениями. Таким образом, получается основа для трёхмерного объекта. Эскиз не имеет деталей и цвета, но отображает основную форму (силуэт) объекта в трёхмерном виде (рис. 8). Затем форма объекта дорабатывается с помощью карты нормалей (normal map). Для этого необходимо провести дополнительную фотосъёмку с одного ракурса, но уже при различных типах освещения (свет с левого бока, с правого, сверху и фронтально). Такой приём позволяет точно отразить форму мелких деталей объекта. Полученные фотоснимки (около четырёх) преобразуются в чёрно-белые изображения и загружаются в программное обеспечение, которое из каждого изображения создаёт отдельный канал карты рельефа для трёхмерного объекта-заготовки.

На основе карты нормалей создаётся displacement-карта (карта смещений) (рис. 9), которая применяется к заготовке, на её основе создаётся требуемая геометрия рельефа. Важно отметить, что для корректного отображения деталей необходимо увеличить количество полигонов исходной модели перед заключительным этапом наложения карты смещений на объект (рис. 10). На последнем этапе необходимо получить информацию для текстуры модели. Текстурные развёртки получают



Рис. 9.
Фотографии с разным освещением (слева), полученная карта нормалей (по центру)
и карта смещений (справа)

Рис. 10.
Результат воссозданной 3D – модели

автоматизированными средствами, методом проецирования точек трёхмерной модели на аппроксимирующую математически правильную поверхность, которая затем разворачивается в плоскость (Войнаровский 2011).

Вышеописанный метод позволяет передать мельчайшие неровности и детали объекта (трещинки, пятна, размытия), не используя при этом специализированное дорогостоящее оборудование для 3D-сканирования. Таким образом, с помощью описанной методики музеи и выставочные комплексы получают возможность включать в свои экспозиции уже несуществующие, частично разрушенные или архиважные объекты.

Каждый проект, описанный в данной статье, способствует развитию существующих технологий и методов интеграции трёхмерной графики в мультимедийные экспозиции объектов культурного наследия. Необходимо также отметить, что виртуальные реконструкции являются наиболее эффективной формой демонстрации объектов культурного наследия (Киссель, Потапенко 2008), что позволяет музеям выполнять просветительскую функцию в форме «образование в развлечении». Кроме того, виртуальные реконструкции могут использоваться в PR-деятельности музеев, стимулируя общественное обсуждение проектов, привлечение спонсоров и партнёров.

Литература

Войнаровский 2011

Войнаровский А. Е. Применение трёхмерного лазерного сканирования и цифровой фотограмметрической съёмки // Материалы НПК «Реставрация как вид экономической деятельности, направленной на сохранение культурного наследия». СПб., 2011.

Киссель, Потапенко 2008

Киссель О. М., Потапенко В. П. Виртуальные реконструкции как интерпретация художественного наследия [Электронный ресурс] // 11-я ежегодная Междунар. конф. «EVA-2008», Москва. Русский музей, Санкт-Петербург, 1–4 декабря. 2008. URL: http://conf.evarussia.ru/eva2008/rus/reports/report_1568.html (дата обращения: 01.12.2014).

Ожегов, Шведова 1997

Ожегов С. И., Шведова Н. Ю. Толковый словарь русского языка. М. : Азбуковник, 1997.

Павленко 2006

Павленко А. В. Разработка методики создания фотограмметрических моделей местности по аэрокосмическим снимкам: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2006.

Сканируем в 3D 2011

Сканируем в 3D с помощью фотоаппарата и 123D Catch [Электронный ресурс] // Работа с анимацией и 3D-графикой. 2011. URL: <http://habrahabr.ru/post/134781> (дата обращения: 25.11.2014).

Фищев 2010

Фищев А. В. Реконструкция исторического прошлого в виртуальной среде компьютера [Электронный ресурс] // Вопросы информатизации образования. 2010. Вып. 14. URL: http://www.npstoik.ru/vio/inside.php?ind=articles&article_key=328 (дата обращения: 24.11.2014).

R. Levy
P. Dawson
University of Calgary, Canada

FORT CONGER. AN INTERACTIVE VIRTUAL WORLD FOR EXPLORING THE SCIENCE OF THE 19TH CENTURY

Introduction

Fort Conger, located in Quttinirpaaq National Park, Ellesmere Island, Nunavut, has seen nineteenth- and twentieth-century expeditions of geographic and scientific discovery. The site was first visited by British explorer George Nares, in 1875–1876, as part of the British Arctic Expedition. Later the United States government selected this site for the Lady Franklin Bay Expedition, the First International Polar Year (1882–1883). This scientific initiative would engage scientists from fourteen countries including Russia, Norway, France and the UK. The US contingent, led by First Lieutenant Adolphus Greely, is known both for scientific achievements and for its unsuccessful retreat from Fort Conger where 21 of its 25 members would perish. Later visitors to the site included Robert Peary and Matthew Henson who made several attempts from Fort Conger to the North Pole in 1899, 1905 and 1908 (Dawson et al. 2013; Dick 2001).

The focus of this research is on the virtual reconstruction of Fort Conger. Under a grant from VMP a website has been created to educate the public on the importance of this scientific expedition in the Arctic. A major component of this website is a virtual time machine enabling the exploration of the site from 1875 to the present.

3D laser scanning of Fort Conger

In the summer of 2010, a Zoller+Fröhlich Imager 5006i phase-based scanner and a Minolta Vivid 910 were used to scan the site. The Z+F scanner was used to scan terrain and large features including the Peary huts, while artifacts were scanned with the Minolta. The existing north-south/east-west baseline established during an earlier survey in the late 1970s was re-established for registering the laser scanning data to existing maps. Once the scanning was completed, the point clouds were registered and edited using Polyworks10 (Dawson et al. 2013). Mesh files created in Polyworks were later imported into 3D Studio Max, where they served as an armature for modeling. 3D Studio MAX as the production platform for this project was used to render images, animations and other multimedia. The 3D reconstruction was then exported as an FBX file into Unity 3D which supports virtual world development.

Computer reconstruction of Fort Conger

The computer reconstruction of the site of Fort Conger provides a visual document of changes made by the British and American expedition teams during their occupation since 1875. Reconstructions are based on both the historical record and physical data. Laser scanning data served as a critical component of the process by providing essential data

on the topography and artifacts and structures found at present on the site. This data also served as a basis for the size, location of Greely's main building and ancillary structures which were built during their occupation (1881–1882). Laser scanning data also provided a 3D record of the current state of the Peary huts reconstructed in 1901 from disassembled parts of the Greely main building. By using this data from the existing structures, it was possible to ascertain the dimensions of the lumber used by Greely. Photographs provided the basis of texture maps used in the computer modeling. Finally the laser scanning record completed in the summer of 2010 provided critical information about the objects that were transported to the site by ship, including windows and doors and the coal fired stoves used for heating and cooking.

The lack of dimensioned drawings requires the use of documentary evidence: reports, photographs and sketches to fill in any missing gaps in the data. Greely's Report of 1888 provides information on the plan and interior design layout of rooms, the location of doors, windows and the approximate size and location of the two lean-tos located on the north and south sides (Greely 1888). One drawing shows the location of tables, beds, desks and stoves along with various scientific equipments. Of particular interest is placement of piers in the north lean-toos for the pendulum and frame used to determine the gravitational constant for Fort Conger. Greely's report also contains information on the dimensioned lumber used for double-wall construction which provided protection against the cold winters. Photographs by George Rice establish the proportion of the building and the location of windows and doors. Most important these photographs help identify the construction techniques used in erecting the building over the course of a week. Like many structures built during the 19th century in America, practices common in balloon frame construction were followed, which required only a hammer, saw and a bag of nails.

A goal of this project was to replicate the construction process in the virtual environment (fig. 1). Rice's photographs taken during the course of construction (August 15 to August 17, 1881) show that once the brick foundation was completed, sill plates, corner posts and wall joists formed the outer walls of the building. Temporary supports kept the corner posts and joists in plumb while the walls were being erected. By August 16, the walls were complete, with the addition of top sill plates wall joists. Floor and attic joists completed the basic structure. By the following day, roof rafters and collar ties are in place, and the wood siding is being attached to the wall joists. Where photographs cannot provide sufficient detail to answer specific construction techniques, period buildings, photographs and drawings provided missing clues. After August 17, the flooring, and inside and outside sheathing would have been added to the structure. Photographs of the completed structure show shutters, chimneys, steps and lean-toos. Also evident is that lean tarpaper held fixed by battens provided a barrier against wind. These photos also show the placement of wind vanes, anemometers essential to the scientific experiments conducted at Fort Conger.

Rice's photographs of the interior space including those occupied by Lts. Greely and Lockwood provide visual references to the tables, chairs, desks, lamps, stoves, items of clothing, maps and books (fig. 2). In a few cases laser scanning data provide the basis for this reconstruction including the wrought iron bed frames. Objects visible in the photos and references in Greely's 1888 report were helpful in searching for catalogue images of the many household objects modeled for the virtual world. Historic photographs also provided the basis for modeling the observatory and the scientific instruments housed inside in addition to the ship the USS Proteus that transported them to Fort Conger.

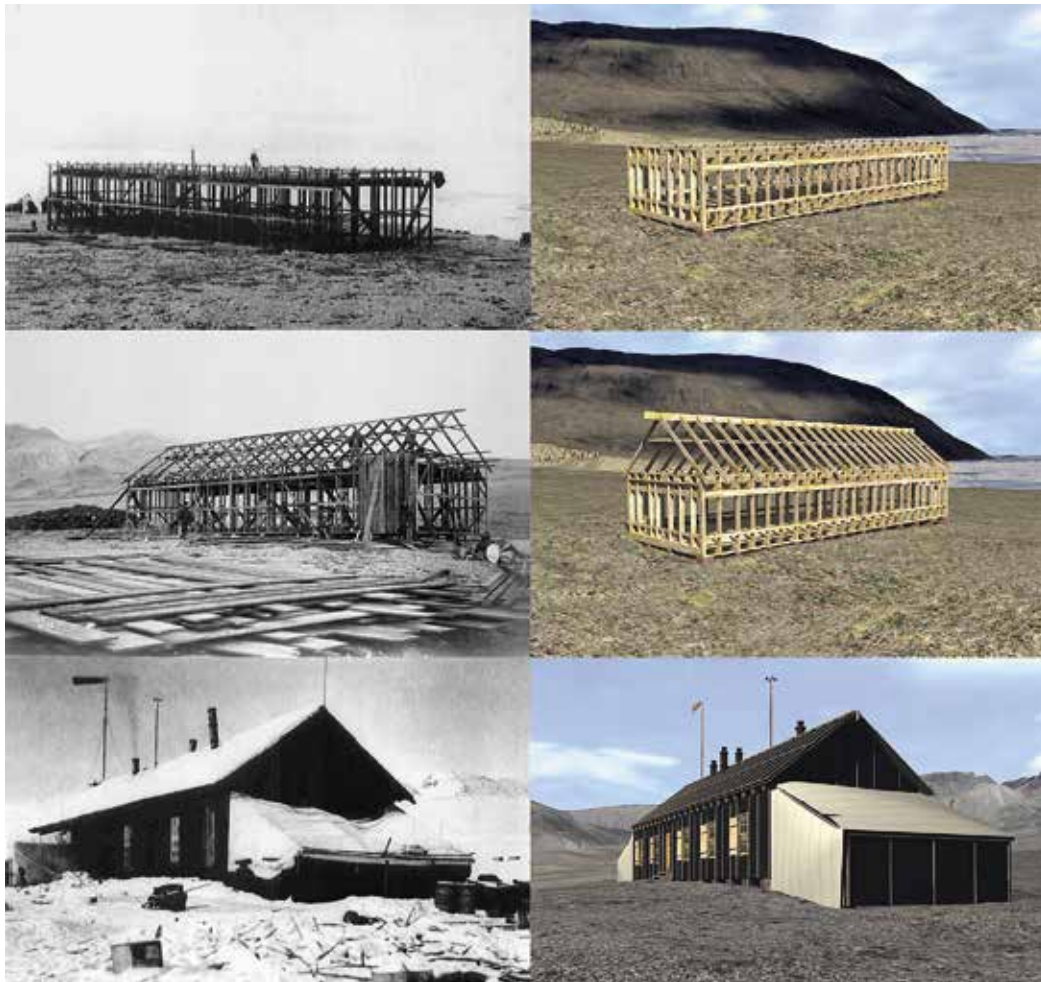


Fig. 1.
Reconstruction process, Ft. Conger (R. Levy)

Peary expedition

Laser scanning data and photographic surveys provide a record of the current state of the Peary huts reconstructed in 1901 from disassembling parts of the Greely main building (PWGSC 2002). The addition of tents and other items revealed in historic photographs complete this reconstruction. By virtually restoring these buildings it is possible to simulate their appearance in 1901.

Discussion and conclusions

In building the virtual world of the site, it is possible to virtually witness the arrival of the HMS Discovery in 1875 which brought the Nares expedition to the site. Later in 1881, with the arrival of the USS Proteus, the landscape is transformed by the unloading of cargo and construction materials used for the main building and observatory. We can virtually explore the interior of these buildings. Links to text, animations, panorama images and computer games and virtual labs provide an explanation of how science was conducted during the 19th century. With the appearance of Peary in 1901, the site is transformed again, with



Fig. 2.
Computer model, Lt. Greely's space top, Lt. Lockwood's space bottom (R. Levy)

the huts built form the Greely main building. Still later in 2010 we can visit the site during its present state of deterioration and learn about the laser scanning technology which was used to document the site.

Acknowledgements

Special thanks to VMP of Canada for their financial support.

References

Dawson et al. 2013

Dawson P. C., Bertulli M., Levy R., Tucker C., Dick L., Cousins P. Application of 3D laser scanning to the preservation of Fort Conger, a historic Polar research base on Northern Ellesmere Island, Arctic Canada. *Arctic* 66:2. 2013. Pp. 147–158.

Dick 2001

Dick L. *Muskox Land: Ellesmere Island in the Age of Contact*. University of Calgary Press, 2001.

Greely 1888

Greely A. W. *Report on the Proceeding of the United States Expedition to Lady Franklin Bay*. Vols. 1,2. Washington : Government Printing Office, 1888.

PWGSC 2002

PWGSC. *Fort Conger Quttinirpaaq National Park of Canada Heritage Record*. 2002.

P. Kuroczyński

Herder Institute for Historical Research on East Central Europe, Germany

O. Hauck

Technical University of Darmstadt, Germany

D. Dworak

Justus Liebig University Giessen, Germany / Institute of Information Technology,
Lodz University of Technology, Poland

J. Lutteroth

LMU, Germany

VIRTUAL MUSEUM OF DESTROYED CULTURAL HERITAGE – 3D DOCUMENTATION, RECONSTRUCTION AND VISUALISATION IN THE SEMANTIC WEB

Introduction

According to new insights of the digital revolution traditional research methods in the humanities are confronted with new perspectives and challenges, particularly related to the computer linguistic, computer-based visualisation, computer vision and, above all, the semantic Web. The project “Digital Reconstructions in Virtual Research Environments – The Portal: Palaces and Parks in Former East Prussia” examines methods for the scholarly approved computer-based reconstruction of cultural heritage (CH) with regard to the advantages of the emerging digital humanities (<http://www.herder-institut.de/go/dp-962a8d>). The project’s approach affects the entire process of the digital reconstruction from data acquisition, reconstruction methodology, annotation and e-documentation, data management and 3D visualisation, as well as the semantic modelling (fig. 1). The focus is on the development of a metadata schema, called Cultural Heritage Markup Language (CHML) (Hauck, Kuroczyński 2015), and the design of a custom web-based virtual research environment based on the WissKI project, funded by the German Research Foundation (<http://wiss-ki.eu>) for archaeology, art and architecture studies with a related interactive *virtual museum*. The CHML acts as background for the subsequent design of a domain ontology for digital reconstruction of cultural heritage, directly referring to CIDOC-CRM (ISO 21127:2014). The Metadata Schema seeks to integrate diverse information related to the destroyed Physical Object, the process of data acquisition, interpretation and 3D modelling, including inline information about geometry, materials, light and camera settings.

Activities of a domain expert (e.g. art historian)

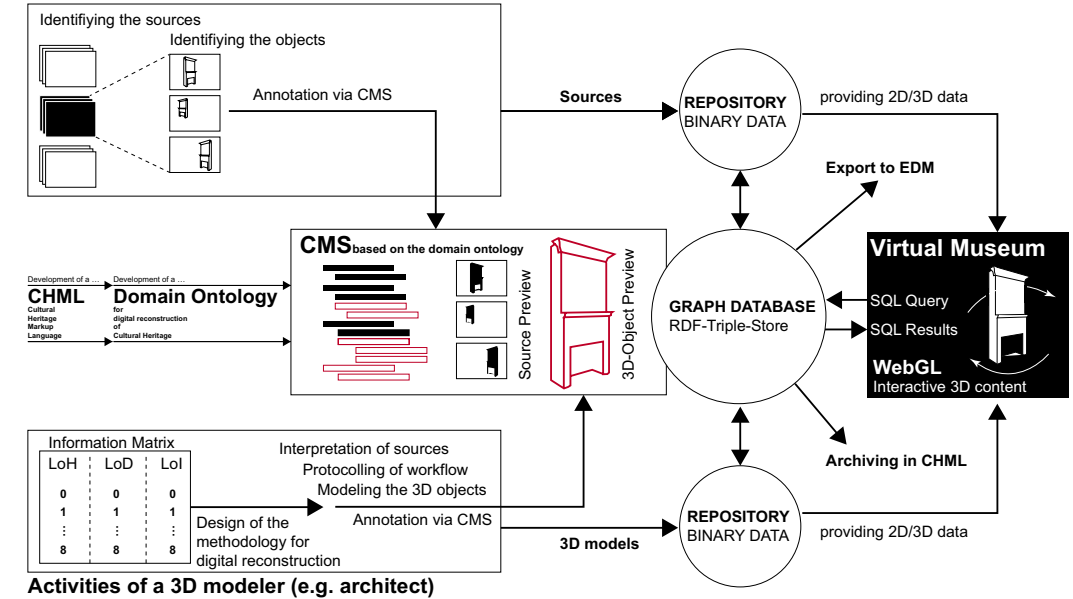


Fig. 1.

In general the workflow divides in an activity of domain experts (e.g. art historians) and 3D modellers (e.g. architects). The Content Management System (CMS) marks the intersection, building up the Graph Database in the backend, based on a domain ontology. The WebGL-based virtual museum is the outpost for interactive dissemination, survey and research of digitally reconstructed cultural heritage

Metadata Schema and reconstruction methodology

CHML differs from existing CH related schemas by describing objects from the 3D reconstruction point of view. The reconstruction process starts thus with the evaluation of sources with only indirect relation to the Physical Object (phyObj). In addition to that, there is no 3D model at the beginning. Hence there is nothing to refer to at the beginning of the digital reconstruction: neither the phyObj that is lost in most of the cases, nor the 3D model which is the final product of the procedure – nothing to refer to but the object the modeller is thinking and talking about: the Semantic Object (semObj). This is the reason why CHML describes semObj; phyObj and 3D born-digital reconstruction objects (3dObj) with their intrinsic properties are subcategories of the semObj (see Figure 2).

Tying the phyObj and 3dObj parts strongly by using the semObj as a rhetoric bracket is the main achievement of the 3D modeller’s workflow described by the reconstruction record and is the resilient basis for the *virtual museum*. Only the compliance between relevant semantic subdivisions of a scene and the building parts of the 3D model representing it makes every interesting item worth to click on and see what’s behind the scene.

The semantic core of CHML is a simple attribute called TYPE. The TYPE gives everything (or every record) a meaning. It is a required attribute for every object, source, activity and actor and consists of a four-letter code (eg. CEIL for ceiling). The TYPE is a non-ambiguous classification that can be linked to thesauri, authority files etc.

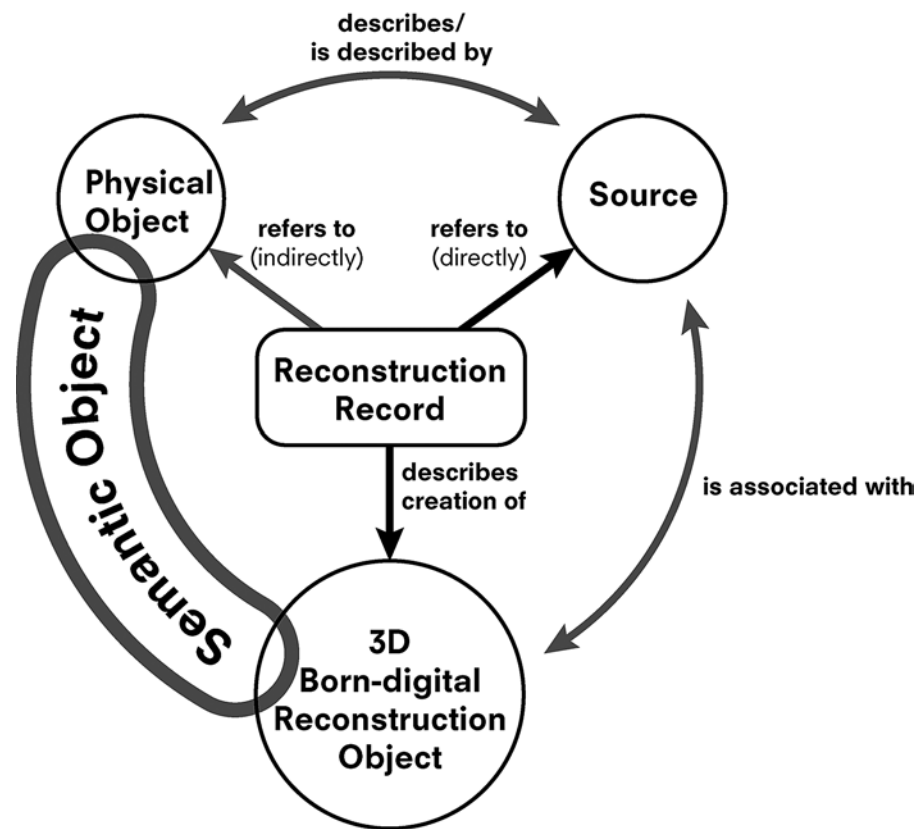


Fig. 2.
Relation of sources, phyObj and 3dObj bound together by the reconstruction activity

Level of Information	Level of Detail		Level of Hypothesis	
Symbolic geometry	0	Known existence	N.A.	Compliant to source (Also if LoH is negative)
Cubic geometry	1	Locatable	1:5.000	Feasible assumption
Diagrammatic geometry	2	General information about appearance	1:500	
Reduced geometry	3	Freehand drawings, paintings, photographs	1:200	
Simplified geometry	4	Survey drawings, close photographs	1:100	
Detailed geometry	5	Detailed drawings, photogrammetry	1:50	
High detailed geometry	6	Detailed drawings, photogrammetry	1:10	
Compliant to building parts	7	High detailed drawings	1:5	
Geometry with all distortions	8	Point clouds from 3D scan	1:1	Completely speculative

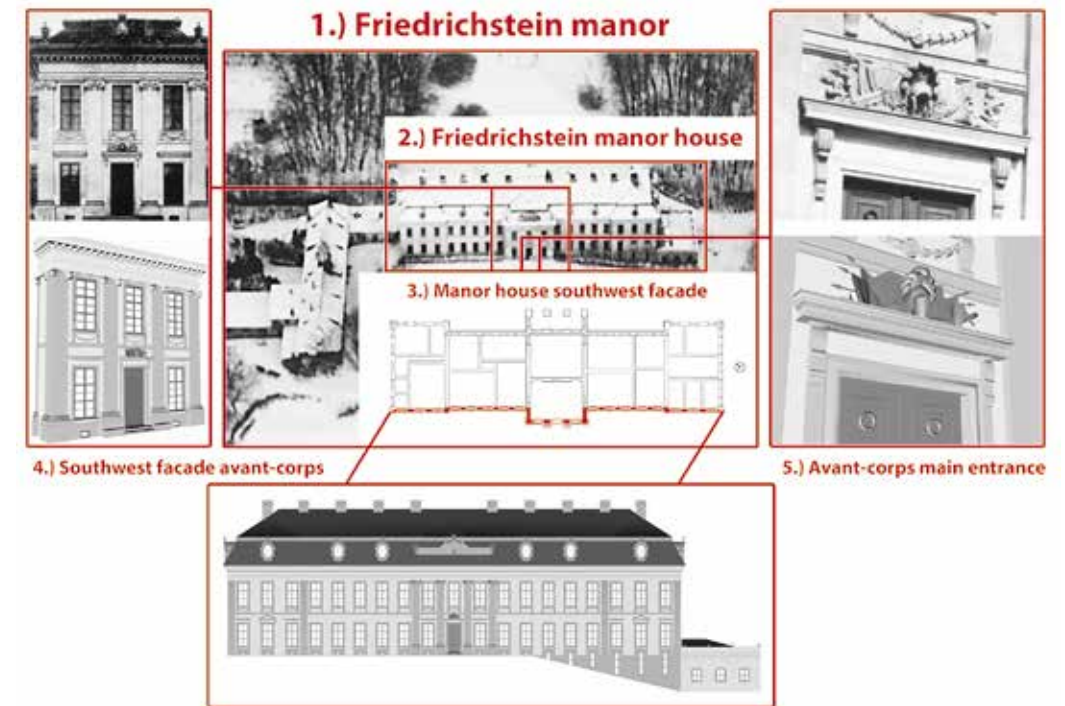


Fig. 3.
Example nomenclature for Friedrichstein

3D models generally have no scale. Instead they follow a concept called *Level of Detail* (LoD) – in most of the cases, the so-called *discrete LoD* (TAN, DAUT) is applied. This concept originates from the need to reduce render time: discrete level of detail, the traditional approach creates LoD for each of the objects separately in a pre-process. At run-time, it picks each object's LoD according to the particular selection of criterions.

Architectural terms in general imply a certain scale or LoD: if someone talks about a palace this includes everything inside the building like storeys, rooms, ceilings, doors, paintings etc. This means that the term *building* implies a lower LoD than the term *room* which implies a lower LoD than the term *wainscot*. We call this *semantic LoD*. These terms can also be linked to traditional architectural scales: a 1:100 section plan does not show details like baseboards, but a 1:20 wall elevation plan does. Thus the information granularity of sources can be expressed the same way: we call it *Level of Information* (LoI). This leads to a simple way of expressing the hypothetical aspect (*Level of Hypothesis* LoH) of a 3D reconstruction model: $LoD - LoI = LoH$. Table 1 shows the resulting matrix called *LoX*.

Table 1. LoX.

3D digital reconstruction of Friedrichstein

For the topic of the ruinous palace of Friedrichstein/Каменка, near Kaliningrad (Heck, Thielemann 2006) in its state around 1944, the modelling process is initiated by the identification, localisation and classification (TYPE) of the semObj *Friedrichstein manor house* in its superior and inferior hierarchy at the site (c.f. CHML elements *is_part_of* and *has_parts*): as it is *part of* of the manor grounds and *has parts*: four main façades, three story levels and the roof. The

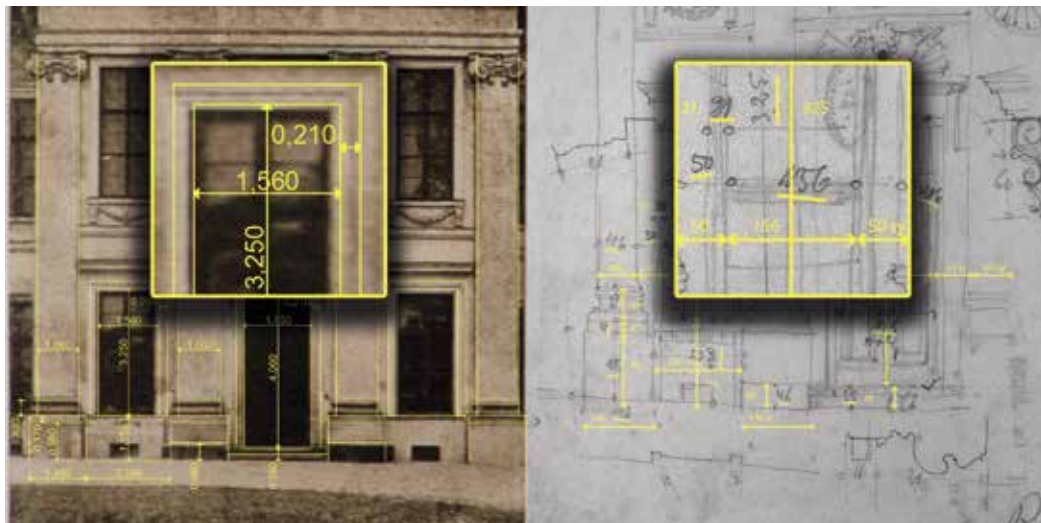


Fig. 4.
Southwest façade avant-corps measurement comparison

semantic structure is also reflected by the nomenclature, meaning that the superior semObj title is also part of the inferior semObj title: 1) Friedrichstein manor. 2) Friedrichstein manor house. 3) Manor house southwest façade. 4) Southwest façade avant-corps. 5.) Avant-corps main entrance (fig. 3). The source evaluation and the modelling process define the depth of the semantic structure for each topic. While the source evaluation projects a general approach to the organisational structure of the building, the subsequent 3D modelling process refines this categorisation. The semObj henceforth serves as a bracket for the phyObj displayed through sources and the 3dObj represented through variations and versions. Variations are alterations of one and the same SemObj, and versions are modifications of 3dObj datasets – not to be mistaken for historical construction phases of a phyObj. Every further discourse on the topic is annotated within the record of the semObj, thus providing a platform for both aspects of its creation in CMS: the source bound argumentation over the phyObj and the reconstruction bound argumentation over the 3dObj. These arguments are mainly discussed in an annotated text, but are also generally contoured by the LoX.

The LoI from the source evaluation gives the modeller a general architectural scale that resembles the LoD of the 3dObj and is a direct indicator for the LoH. The source evaluation of Friedrichstein manor house identifies a historical sketch of the Southwest façade's avant-corps as the source with the highest LoI 5. The direct consequence is that the LoD of the 3dObj Southwest façade avant-corps with all its parts and its superior 3dObj Manor house southwest façade are of the same LoD. The Southwest façade avant-corps object is consequently modelled corresponding to a scale of 1:50, according to LoD 5. The avant-corps sketch however does not cover the entire height of the building, which leads to a comparison of its measurements with corresponding photographs that are evaluated with a LoI 4 (fig. 4). The result is a 3dObj with a LoD 5 that contains more detailed information for some parts that should have been modelled in LoD 4 leading to a LoH of 1.

Whether this higher LoH is justifiable is not important at the modelling stage, because every modelling activity is documented separately and annotated according to its sources and the individual interpretation in accordance with the London Charter (Denard 2012). The discussion

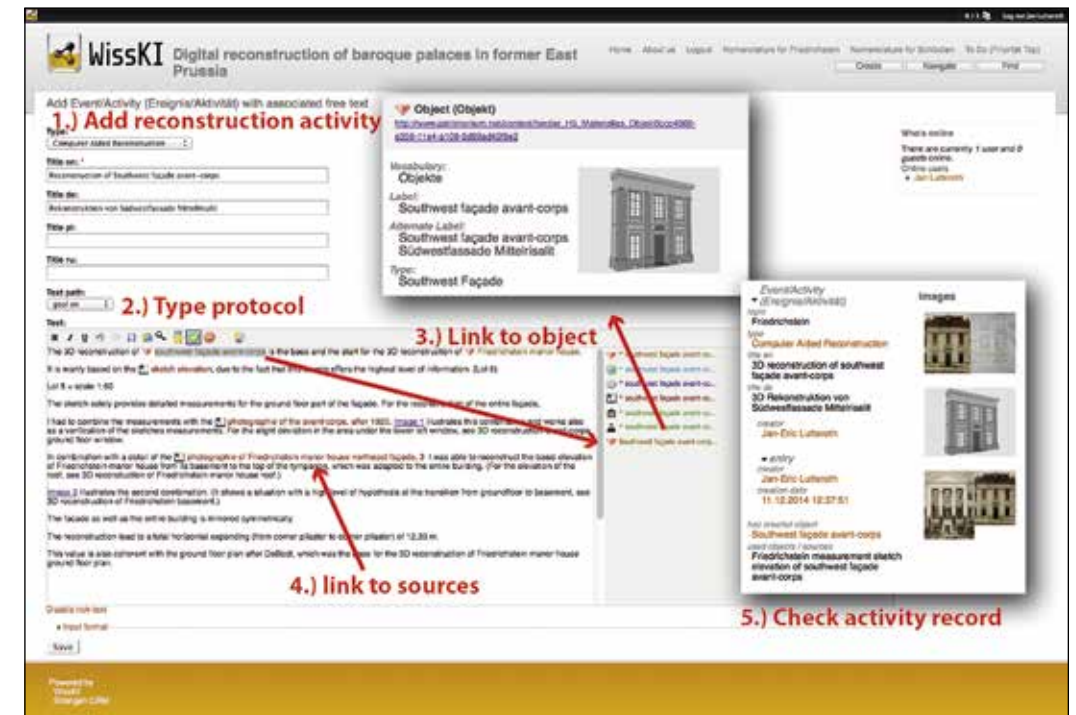


Fig. 5.
Sample for an activity record in the Content Management System, based on WissKI:
1.) The modeller adds a new reconstruction activity to the system.
2.) Protocols his modelling process through annotated text, which is linked to
3.) the semObj as well as 4.) the used sources. In the activity record 5.) this connection is retracable back to the 3dObj

of the accuracy or sufficiency of the model can hereby be carried out directly at its sources and is visualised through alternative variations of the semObj. The documentation process on the other hand alters into an indispensable act that keeps track of the decisions made during the 3D modelling. It is part of the reconstruction activity in form of annotated protocols and elucidative renderings (fig. 5). This creation activity is relinked through the created object to the 3dObj and vice versa from the 3dObj via object events to the activity, as well as the used sources and their evaluation protocols, thus creating a fully comprehensive reconstruction.

Methods for storing and visualising 3D data sets

In our project, we use Model-View-Controller model (MVC), which creates a background layer for controlling, storing and designing our concept of a virtual museum. In basic language, a model layer is a database for any kind of data (3D models, texts, photos etc.). It is possible to manipulate it by a controller layer, e.g. to display geometry or semantic content from the database. A user request changes the view layer, which defines the final visualisation's result.

In fact, any digital reconstruction requires many models of buildings, trees etc., so it is necessary to store and display huge data sets of vertices and faces, which should be sent via Web. We decided to improve an aspect of coding and uploading large 3D data sets, with an emphasis on architectural models. We proposed a technique for storing 3D geometrical data in PNG files (Dworak, Pietriska 2014), because of their small size, lossless compression (LZW) as well

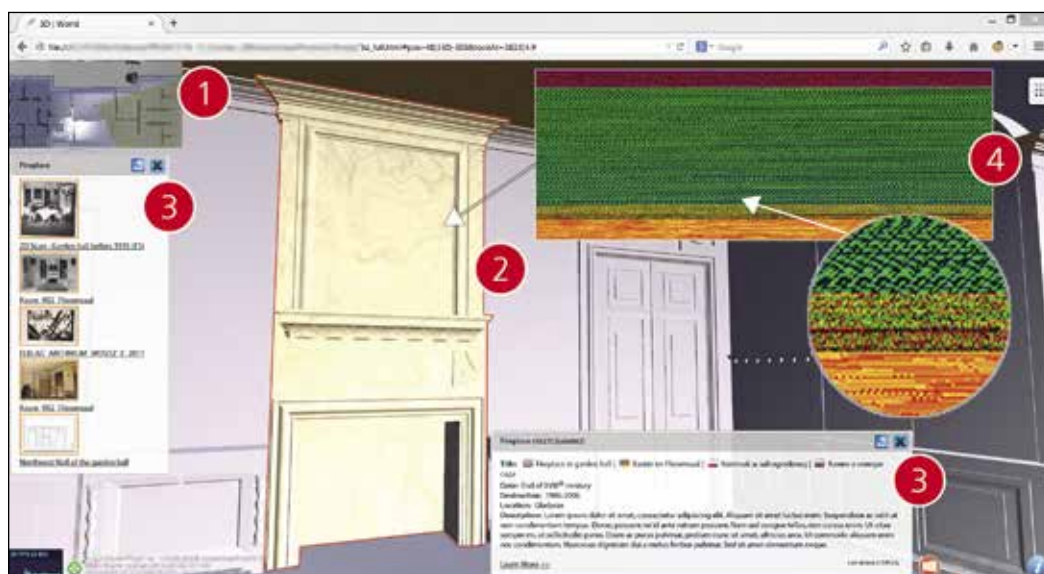


Fig. 6. Integration of interactive semantic 3D objects in the "Virtual Museum" (WebGL technology): exploring the Palace in Schlodien, integrated position map (1), visualisation of sources linked in the repository (2), retrieval of metadata and paradata from the semantic Graph Database (3) and PNG file structure for storing 3D data (4)

No. vertices	OBJ	PNG
482	0.76 MB	0.13 MB
35,000	3.50 MB	0.76 MB
550,000	79.00 MB	11.50 MB

Table 2. File size comparison for different models stored in OBJ and PNG format

as standardised and portable form. In addition to that, it is designed for transferring it over the Internet. Therefore, we save 3D data to RGB channels of a 2D graphic file. Alpha channel of the PNG file is used to separate data sets: vertices, then transparent pixel, faces, transparent pixel, normals, transparent pixel and UV's. It is possible to decode data from the PNG file easily to its original form. LZW eliminates thus redundant data, what is an important point in our research. As Table 2 shows, this method produces smaller output files than original OBJ ones. For example, in case of original 3D data (with 550,000 vertices) of size 79MB, it outputs only a 11.5MB file.

Conclusion

An innovative LoX concept for digital reconstructions impacts on the methodology and promises good results in expressing the value of hypothesis in the computer visualisation; a custom design for web-based 3D data process enables an interactive exploration of the reconstructed environment within the virtual museum. The scholarly impact is based on the

validity, transparency and sustainability of the semantically enriched textual, image-based and 3D object-oriented record, expressed in the Linked Open Data standard. On the one hand, the domain specific design brings some extensions of the accustomed semantics to be discussed with CIDOC-CRM, e.g. the introduction of so-called Semantic Objects next to Physical Objects. On the other hand, the project reveals several challenges to be solved in further research, such as the necessity in the development of domain specific multi-lingual thesaurus, integration of adequate research tools and the optimisation of web-based processing of 3D data sets.

References

Denard 2012

Denard H. A new introduction to the London Charter // Paradata and Transparency in Virtual Heritage / in A. Bentkowska-Kafel, D. Baker, H. Denard (eds.). London : Ashgate. 2012. Pp. 57–71. Also available: <http://www.londoncharter.org>. Accessed 12 August 2014.

Dworak, Pietriszka 2014

Dworak D., Pietriszka M. Fast encoding of huge 3D data sets in Lossless PNG format. New Research in Multimedia and Internet Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing 314. Springer, 2014. Pp.15–24.

Hauck, Kuroczyński 2015

Hauck O., Kuroczyński P. Cultural heritage markup language – designing a domain ontology for digital reconstructions. Virtual Archaeology (Methods and Benefits). Proceedings of the Second International Conference held at the State Hermitage Museum 1–3 June 2015. Saint Petersburg : The State Hermitage Museum Publishers, 2015. Pp. 250–255

Heck, Thielemann 2006

Heck K., Thielemann C. (eds.). Friedrichstein. Das Schloß der Grafen von Dönhoff in Ostpreußen. München : Berlin, 2006.

ISO 21127: 2014

ISO 21127: 2014 Information and Documentation – A Reference Ontology for the Interchange of Cultural Heritage Information. Available: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=57832. Accessed 4 February 2015.

**ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ**

**ADVANCED METHODS
OF ARCHAEOLOGICAL PROSPECTING**

В. П. Мокрушин, М. В. Козлов

ОАО «Наследие Кубани», Россия

**ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
В АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

В 2013–2014 годах на территории Краснодарского края (Северский и Усть-Лабинский районы) осуществлялись охранные исследования поселения Карское 2 и городища Новолабинское 4 (меотская культура, ранний железный век). Была поставлена задача максимально синхронизировать процесс полевых изысканий с оформлением альбома графической документации к отчёту, используя при этом системы автоматического проектирования. Для решения поставленной задачи использовалась хорошо известная платформа AutoCAD с её богатыми возможностями адаптации. Средства программирования не применялись.

Оба созданных проекта были идентичны по структуре и содержали две папки – одна вкладывалась в другую. В папках размещались связанные файлы; каждый представлял собой профиль одной из стенок с наименованием, отражающим нумерацию соответствующего участка раскопа. Для имеющихся в файлах объектов с помощью меню «Формат» были заданы одинаковые свойства: 3D-высота линий – 0, их вес – 0,18 мм; высота текста – 10 единиц (следует отметить, что в AutoCAD 2010 не используются такие термины, как толщина или жирность линии, размер шрифта, кегль). Для лучшего визуального восприятия западные и южные борта бровок и стенок выделялись красным (цвет 230 в системе ICA); остальные борта были оставлены чёрно-белыми (тёмная картинка на светлом фоне либо наоборот).

В каждом файле было создано три слоя: «нив», «служ», «1». Они никак не связаны со стратиграфическими слоями, фигурирующими в археологических отчётах, и эти понятия не следует путать. Так, слой «нив» содержал надписи, нивелировочные отметки и относящиеся к ним топографические засечки (красные и синие треугольники в цветной окантовке). Слой «служ» был необходим для того, чтобы связать чертежи друг с другом посредством служебной разметки: горизонтальная ось обозначает «нулевую» поверхность, от неё ведётся отсчёт нивелировочных отметок; вертикалями, нанесёнными с интервалом 250 единиц, отмечены точки нивелировки поверхности и дна раскопа, производившейся через каждые 2,5 м. Слой «1» является рабочим и включает все основные графические материалы.

Обычно противолежащие борта бровок фиксируются не одновременно, при неодинаковой влажности и освещённости, иногда разными людьми, что зачастую ведёт к ошибкам при определении границ стратиграфических слоёв. Поэтому в проекте восточные и южные фасы бровок были совмещены по «нулевой» горизонтали соответственно с западными и северными, в зеркальном отражении, что позволяло обозревать их одновременно, а в случае необходимости корректировать (рис. 1).

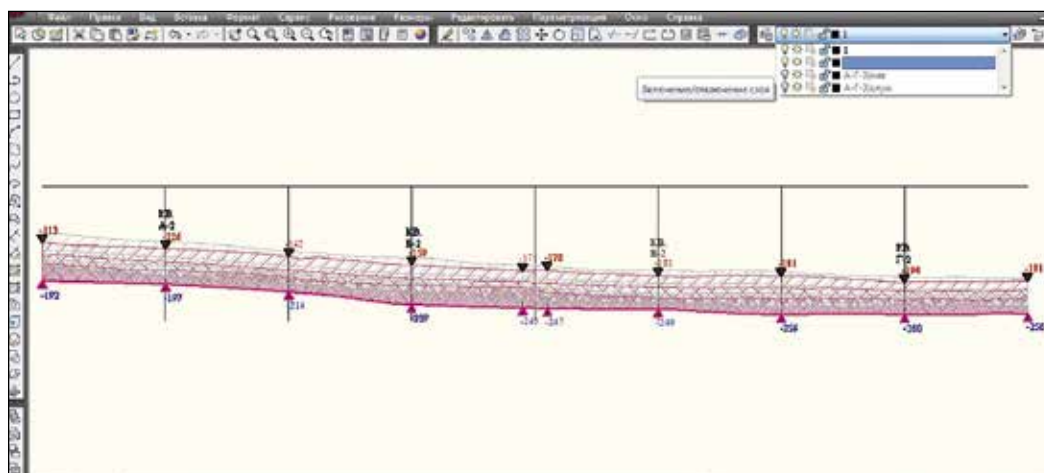


Рис. 1.
Поселение Карское 2. САПР AutoCAD. Фрагмент восточного фаса бровки А-Г-2, зеркально совмещённой с противоположной стенкой (А-Г-3). В раскрытом выпадающем меню представлены слои обоих профилей; два из них «выключены»

Если при вставке в файл растровых рисунков полевых чертежей в раскрывающейся панели «Задание пути» (окно «Вставка изображения») выбрать графу «Относительный», всю папку с пакетом чертежей можно будет легко переместить в другое место (в том числе на другой компьютер). В противном случае связи между файлами потеряются. Полевой чертёж обводился по контуру замкнутой полилинией, 3D-высота которой была равна 1 (меню «Свойства»). После нанесения остальных элементов, включая надписи, выполнялась штриховка профиля. В заключение замкнутый контур профиля трансформировался в 3D-тело (команда «Выдавить» – “Extrude”, высота по оси Z – -5). Отрисовка профиля чаще всего производилась не единовременно, а отдельными участками, по мере их готовности. Соседние 3D-тела в этом случае объединялись (команда «Объединение» – “Union”).

Чтобы уменьшить размеры, готовый чертёж профиля необходимо очистить, вызвав диалоговое окно «Внешние ссылки» (меню «Вставка»). В таблице «Ссылки на файлы» под названием открытого документа перечислены имена вставленных изображений. Те из них, которые отмечены жёлтым треугольником с восклицательным знаком и имеют статус «Не используется», следует удалить. Для освобождения проекта от не востребуемых данных целесообразно воспользоваться опцией «Очистка чертежа» (запускается из панели «Утилиты», команда «Очистить»). Если активировать функцию «Просмотреть элементы, которые можно удалить», то окажутся выделенными все имеющиеся в файле, но не используемые объекты. Последние содержатся в папках, помеченных крестиком, и убираются из проекта нажатием кнопки «Удалить всё».

Все созданные dwg-файлы автоматически отображаются в сводном документе «Профили», в котором служебная разметка отключена. Под чертежом имеются клавиши «Модель», «с-пр», «вост-пр(2)», «вост-пр», «з-пр(2)», «з-пр». Нажав первую из них, можно открыть вкладку с тем же именем. В ней отрисованные профили сгруппированы по странам света, в соответствии с сеткой раскопа и нумерацией; про-

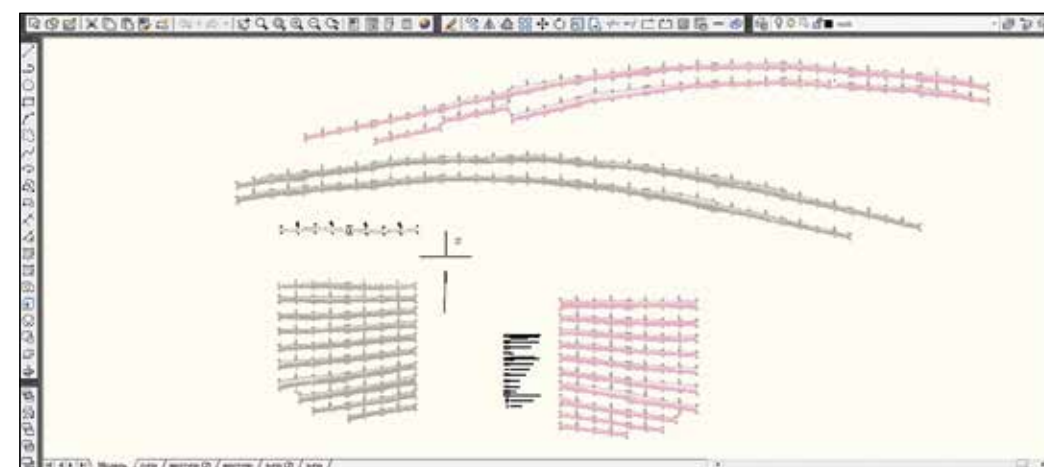


Рис. 2.
Поселение Карское 2. САПР AutoCAD. Сводный чертёж «Профиля». Вкладка «Модель». Один из профилей выбран целиком и перемещается вверх. Условные обозначения – в середине документа, внизу

филь выделяется простым щелчком и, если нужно, перемещается целиком. Тут же представлены условные обозначения, также доступные для редактирования (рис. 2). В диалоговом окне «Диспетчер свойств слоя» отображаются ссылки на все активные профили, любой из которых можно удалить или просто отключить видимость. Следующая вкладка «с-пр» содержит полностью готовые длинные северные и южные профили с условными обозначениями и необходимыми подписями. Цветовая схема, использующая, оттенок красного «230», заменена на чёрно-белую при выводе на печать. Формат листа 900 x 3000 мм (альбом) предназначен для цветного ленточного плоттера с шириной каретки 600 мм. Предполагается, что распечатанный лист будет разрезан вдоль на два отдельных чертежа. При необходимости в меню «Диспетчер наборов параметров листов» можно откорректировать предустановленные настройки. Желательно подготовленные для тиражирования документы сохранять в формате pdf, установив виртуальный принтер doPDF.

Если включить слой «Вид», на вкладке появится несколько дополнительных рамок – «Плавающие видовые экраны». Их контуры, размер, форму, местоположение несложно изменить, например, с помощью ручек выбора – синих квадратиков, которые появляются после щелчка по объекту. Одновременно можно отредактировать линейный масштаб, рамку вокруг чертежа и т. д.

Рассматриваемый чертёж подготовлен для распечатки в масштабе 1:50. Изменение масштаба осуществляется с помощью кнопки «Масштаб видового экрана», расположенной в самом низу, под «Командной строкой» AutoCAD. Но предварительно следует нажать расположенную рядом кнопку, которая после этого приобретёт новое имя – «Модель» (рис. 2). Теперь, если щёлкнуть внутри «Плавающего видового экрана», экран станет активным, а его рамка окажется обведённой жирной линией. В таком состоянии команда «Панорамирование» позволяет смещать все изображение целиком.

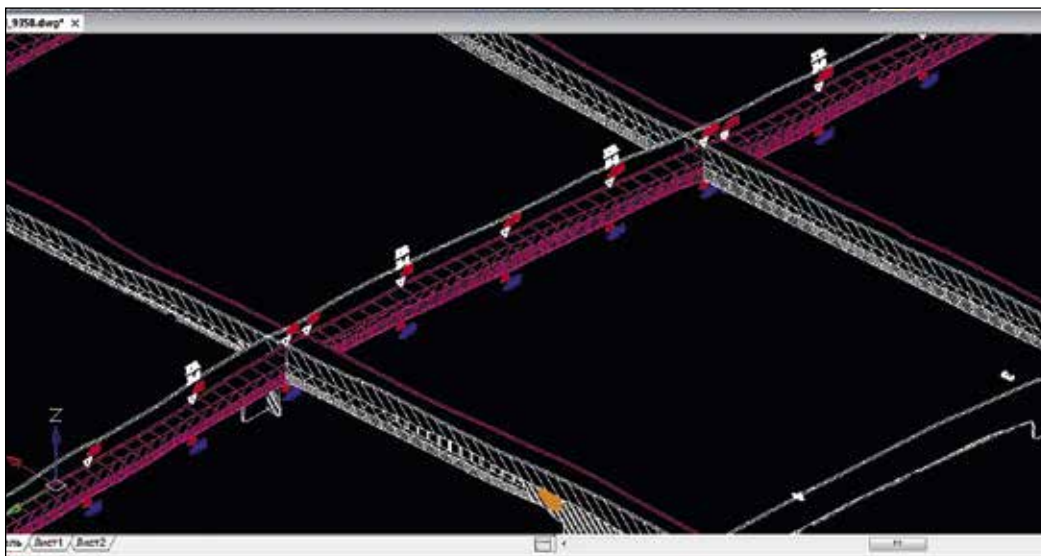


Рис. 3.
Поселение Карское 2. САПР NanoCAD Free. Сводный чертёж «План_1_33_9358».
Трёхмерная модель раскопа. Фрагмент

Остальные 4 вкладки «вост-пр(2)», «вост-пр», «з-пр(2)», «з-пр» содержат, соответственно, профили восточных и западных стенок.

Чертёж «План_1_33_9358» также включает все профили, но только слой «1». Это автоматически сформированная трёхмерная модель раскопа, перемещение по которому осуществляется с помощью собранных в одну панель кнопок. Здесь имеется возможность контролировать и анализировать стратиграфическую ситуацию, оперативно отслеживать стыки бортов раскопа. При этом требуемые корректировки и правки можно осуществлять непосредственно в самой 3D-модели.

Подробные инструкции по созданию археологических чертежей в САПР AutoCAD можно найти в Сети по адресу <http://vlmokrushin.livejournal.com/1482.html>.

Dwg-файлы по поселению Карское 2 выложены на Яндекс-диске и могут быть загружены по адресу: http://yadi.sk/d/8r_mP3uiJPUTk.

На сегодняшний день в Интернете в свободном доступе представлено несколько различных САПР, в том числе с открытым исходным кодом. В первую очередь можно упомянуть nanoCAD Free – отечественный продукт, включающий, по заявлению производителя ЗАО «Нанософт» (<http://www.nanocad.ru/>), «все необходимые инструменты» базового двухмерного проектирования с возможностью просматривать также 3D-модели. nanoCAD Free работает с документами в формате DWG и напоминает известный многим AutoCAD, что, несомненно, должно сильно облегчить переход на новую платформу (рис. 3).

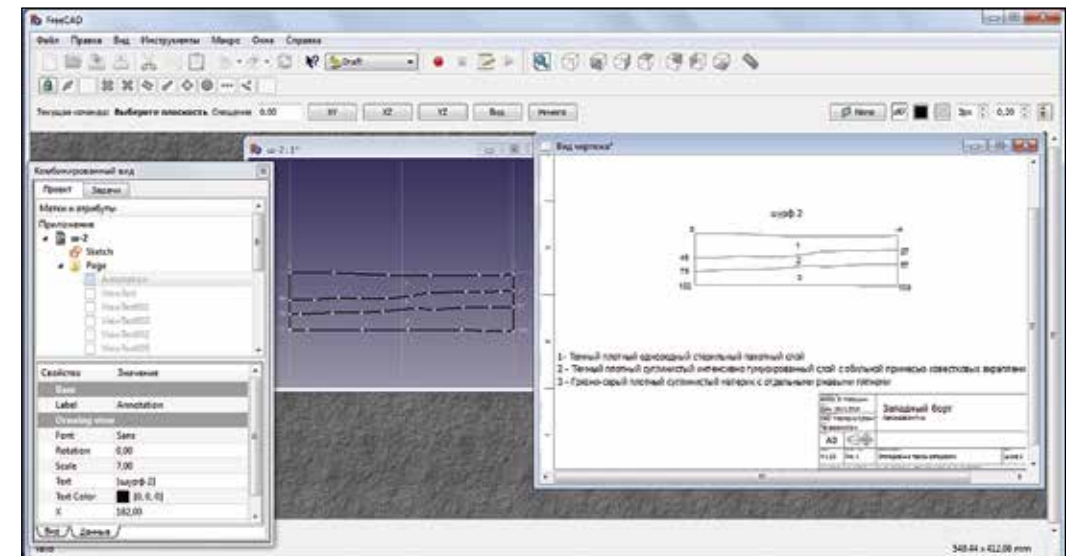


Рис. 4.
САПР FreeCAD. Чертёжный модуль (The Drawing module). Профиль шурфа.
В левой боковой панели «Комбинированный вид» представлена структура FCStd-проекта. Выбран объект «Annotation», внизу приведены его свойства.
В правом окне – подготовленный для распечатки документ в формате svg

Некоторую популярность приобрёл BRL-CAD (<http://brlcad.org/>), первоначально разрабатывавшийся американскими военными инженерами (Ballistic Research Laboratory, US Army). К сожалению, в русскоязычном Интернете слишком мало материалов по его использованию и применению.

Следует также отметить САПР-Архимед (<http://archimedesca.d.githu.io/Archi-medes/>); Open CASCADE Technology (<http://www.opencascade.org/>); AR-CAD (<http://www.ar-cad.com/>), распространяемые по лицензии LGPL.

Более подробную информацию (в основном на иностранном языке) можно найти в пакете FreeCAD, последняя версия – 0.14. Этот универсальный параметрический трёхмерный редактор, позволяющий создавать объёмные модели, до сих пор малоизвестен в России. В отечественном Интернете имеется особое сообщество (<http://freecad.livejournal.com/>); также доступны видеоуроки: (<http://www.cadtv.ru/freecad-videourok/>) и руководства по использованию программы.

FreeCAD поддерживает несколько различных форматов документов, как на импорт, так и на экспорт (включая pdf); имеется возможность сохранять «снимки экрана». Программа ориентирована в первую очередь на машиностроительную отрасль и другие области инженерных разработок, включая архитектуру. Несмотря на свои широкие функциональные возможности, FreeCAD относительно прост в использовании, а его отдельные операции могут быть понятны даже людям, имеющим базовые представления о 3D-моделировании. Программа реализована с применением компилятора языка Python и в значительной мере русифицирована; содержание команд прокомментировано с помощью всплывающих подсказок; созданные проекты сохраняются с расширением FCStd. CAD-возможности FreeCAD базируются на ядре

профессионального уровня OpenCasCade и реализованы в виде отдельных самостоятельных модулей, открывающих доступ к объектам и функциям OpenCasCade.

Так же как и в AutoCAD, двумерные объекты создаются в FreeCAD с помощью полилинии, B-сплайна, отрезков и фигур (прямоугольник, симметричный многоугольник, окружность, дуга). Идентичны и некоторые команды редактирования («Переместить»). В целом же отличия двух пакетов разительны. Прежде всего, внутри документа FreeCAD имеются объекты различных типов с собственными уникальными именами, в том числе надписи и текстовые аннотации. Выбор объектов, их редактирование, изменение характеристик осуществляется через панель «Комбинированный вид». Чертежный модуль (The Drawing module) позволяет подготовить бумажный вариант документации в формате svg, с проекциями объектов, названием и логотипом организации (рис. 4).

В целом, использование новейших аппаратных и программных средств даёт возможность уже в процессе полевых изысканий подготовить альбом графической документации к отчёту в должном качестве.

М. О. Жуковский

АНО «Современные технологии в археологии и истории», Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БПЛА И ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ АЭРОФОТОСЪЁМКИ В СОВРЕМЕННЫХ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

1. Введение

Практика использования аэрофотосъёмки в археологических исследованиях насчитывает уже около века. Первые фотографии памятников археологии с воздуха были сделаны с борта аэростатов (пирамиды в Гизе – 1904 год, фотографии Стоунхенджа, выполненные лейтенантом Шарпом – 1906 год) (рис. 1). В ходе Первой мировой войны активно развивается аэрофотосъёмка с борта самолётов. Вскоре она становится основным инструментом получения данных дистанционного зондирования и начинает повсеместно применяться в археологических исследованиях. При этом фонд аэрофотоснимков, используемых археологами, лишь в незначительной мере состоит из данных, полученных в ходе целенаправленной съёмки, выполненной специально в рамках археологических проектов. Основная часть снимков происходит из архивов разведывательных полётов и из материалов картографирования территорий, выполнявшихся в разные годы. В частности, аэрофотоматериалы люфтваффе, полученные в годы Второй мировой войны и насчитывающие около 1,2 млн негативов, до сих пор имеют огромное значение в ретроспективных археологических исследованиях (Жуковский 2012; Zhukovsky, Pushkina 2013).

Уже в первые десятилетия XX века энтузиастами были опробованы и другие способы получения дистанционных фотоснимков: от воздушных змеев до использования почтовых голубей (голубиный аэроотряд Юлиуса Нойброннера) (рис. 2) и ракет (Альфред Нобель, Альберт Мауль). Сегодня, через сто лет после первых опытов применения беспилотных средств для дистанционной фотосъёмки с воздуха, БПЛА получают всё более широкое распространение в современных археологических исследованиях.

2. Беспилотный летательный аппарат и используемое оборудование

В течение ряда лет специалисты АНО «Современные технологии в археологии и истории» (г. Москва) активно применяют мультироторный БПЛА собственного изготовления для получения высокдетальных аэрофотоснимков для решения широкого круга задач в рамках археологических исследований. Летательный аппарат построен на базе платформы Mikrokopter (www.mikrokopter.de), хорошо зарекомендовавшей себя благодаря широким возможностям программно-элементной базы, гибкости настройки и надёжности компонентов. Аппарат весом около 2,5 кг имеет



Рис. 1.
Пирамиды в Гизе, Египет. Снимок с воздушного шара, 1904 год

электронный блок управления на борту и оснащён шестью электромоторами, способными поднимать в воздух полезную нагрузку до 0,8 кг (рис. 3).

БПЛА оборудован следующими электронными компонентами, обеспечивающими контроль и управление полётом: трехосевые гироскопы, акселерометр, компас (датчик Холла), альтиметр, GPS-приёмник. Управление полётом осуществляется с помощью авиамодельного радиопульта дистанционного управления. Двухсторонний выделенный радиоканал связи дополнительно обеспечивает передачу телеметрической информации с борта аппарата на терминал управления на земле (персональный компьютер) и приём управляющих команд. В блок телеметрических данных входят текущие параметры аппарата: технические значения состояния электронных систем, координаты, высота и скорость перемещения БПЛА, данные о выполняемой программе полёта. Благодаря наличию GPS-приёмника полёт аппарата может осуществляться в полностью автоматическом режиме по заранее определённому маршруту. В число настраиваемых параметров маршрута входят координаты контрольных точек, ориентация, высота и скорость перемещения БПЛА.

Технически высота полёта аппарата составляет до 3,5 км, а радиус действия определяется дальностью радиосвязи между пультом и БПЛА. На практике рабочий предел высоты полёта не превышает, как правило, 250 м, радиус действия от точки запуска – 400–500 м. Среднее время полёта составляет около 10–12 минут, протяжённость пролетаемого маршрута при скорости 3–4 м/с – около 2–2,5 км.



Рис. 2.
Голубиный аэроотряд Юлиуса Нойброннера



Рис. 3.
БПЛА в полёте

Для получения аэрофотоснимков используется компактный фотоаппарат Canon G12 с матрицей разрешением 12 Мп. Несмотря на наличие ручного дистанционного управления спуском камеры, как правило, используется автоматический режим съёмки с заданным интервалом – 1–3 с. В итоге делается избыточное количество снимков (400–600 кадров за один залёт), что позволяет гарантировать практически 100 % вероятность получения резких и чётких фотографий на протяжении всего полётного маршрута. Стабилизация камеры обеспечивается за счет активного подвеса, корректирующего наклоны БПЛА во время полёта по двум осям. Это позволяет сохранять заданную ориентацию фотоаппарата в любой момент времени на протяжении всего полёта. Съёмка осуществляется в двух режимах – планшетном и перспективном. При планшетном режиме снимки делаются из надира (вертикально вниз) с постоянной заданной высоты, обеспечивая равномерное покрытие территории, над которой проходит полётный маршрут. Перспективный режим позволяет фиксировать общие виды снимаемых объектов, в том числе панорамные, совершая облёт по определённой траектории с переменной высотой и удалением. Для съёмки в планшетном режиме визуальный контроль ориентации камеры, как правило, не требуется, в то время как в перспективном он необходим. Контроль обеспечивается за счет миниатюрной видеокамеры, дополнительно установленной на фотоподвесе БПЛА и совмещённой по осям с основным фотоаппаратом. Передача видеосигнала осуществляется по радиоканалу на терминал управления в режиме реального времени и позволяет корректировать положение и ориентацию летательного аппарата в зависимости от задач и объекта съёмки.

В планшетном режиме производительность одного залёта БПЛА составляет около 5–7 га при высоте полёта 80–120 м, что позволяет выполнять за один рабочий день полное ортофотопокрытие территории площадью до 75 га. Съёмка производится квадратами 250 x 250 м, соответствующими одному залёту. Полётный маршрут строится по принципу веретена, при этом возможно как зависание летательного аппарата в заданных контрольных точках (определяемых GPS-координатами) с определённым интервалом, например, через каждые 10, 30 или 50 м, или непрерывный безостановочный полёт на заданной скорости. Качество получаемых снимков не зависит от выбранного полётного режима.

3. Обработка данных аэрофотосъёмки

Несмотря на то что отдельные аэрофотоснимки, в частности перспективные изображения, полученные с борта БПЛА, могут быть использованы самостоятельно, в подавляющем большинстве случаев материалы съёмки проходят дополнительную обработку. В первую очередь это касается получения бесшовных мозаичированных ортофотопокрытий территории памятников археологии. Ортофотопокрытия создаются с помощью автоматизированных фотограмметрических технологий обработки данных, реализованных в ряде программных комплексов. В настоящее время всё большую популярность приобретают автоматизированные алгоритмы, построенные по принципу «чёрного ящика»: получая набор фотоданных, программа автоматически создаёт на его основе трёхмерную модель сфотографированного объекта (в англоязычной литературе используется термин *structure-from-motion*). Таким образом, на смену традиционному процессу фотограмметрической обработки стереопар изображений, основанному на ручном выборе общих контрольных точек, приходит гораздо более быстрый и лёгкий в освоении подход. Широкому рас-

пространению автоматизированных алгоритмов способствует повышение точности моделей, получаемых в ходе «неконтролируемой» обработки данных и существенное увеличение вычислительной мощности настольных компьютерных систем, которые позволяют решить вопрос качества обработки данных за счет экстенсивного роста выполняемых автоматических операций. В число наиболее известных программных комплексов, в которых реализованы автоматизированные фотограмметрические алгоритмы, входят AgiSoft PhotoScan, VisualSFM, Autodesk 123D Catch и другие.

Одним из простых (с точки зрения археолога) решений в этой области является ПО AgiSoft PhotoScan (www.agisoft.com), получившее в последние годы широкое распространение в археологических проектах, в частности, в масштабном проекте по оцифровке культурного наследия “Europeana” (www.europeana.eu). Автоматизированный алгоритм обработки данных программы позволяет извлекать трёхмерное облако точек из массивов фотоизображений, сделанных с существенным (30–50 %) перекрытием полей обзора. При этом точность относительных координат извлечённых точек зависит в первую очередь от качества и резкости исходных снимков. На основе облака точек строится триангуляционная модель поверхности объекта съёмки: отдельного археологического предмета, объекта, вскрытого при раскопках, микрорельефа местности. На модель накладывается текстура, полученная из мозаики исходных фотоизображений. При этом принципиально важно, чтобы триангуляционная модель являлась геометрически корректной объёмной фигурой без пространственных искажений, присущих фотоснимкам, в частности – перспективной дисторсии, что позволяет сформировать правильное ортофотоизображение, в точности передающее пропорции объектов съёмки.

Однако полученная таким образом трёхмерная текстурированная модель не имеет масштаба и ориентации в пространстве. Проецирование модели в систему абсолютных координат осуществляется с помощью включения в обработку данных о местоположении контрольных точек – маркеров. Как правило, используются специально расставленные метки, равномерно распределённые по поверхности моделируемого объекта. Размер маркеров подбирается таким образом, чтобы они, оставаясь малозаметными, могли в то же время быть легко идентифицированы на исходных фотоснимках. В случае создания ортофотопокрытий участков местности, например, территории памятников археологии, маркеры размещаются на поверхности земли перед проведением съёмки, и их координаты определяются с помощью геодезического оборудования – тахеометром или геодезической GPS-системой. Немаловажно, чтобы данные о координатах контрольных точек использовались также для проведения калибровки объектива камеры, используемой при аэрофотосъёмке. Погрешность финальных координатно-привязанных (ректифицированных) моделей не превышает, в среднем, 0,001 % от их размера, или, другими словами, координатная ошибка модели микрорельефа территории площадью 50–100 га составляет 2–3 см.

Пространственное разрешение мозаичированных ортофотоснимков, получаемых при аэрофотосъёмке с борта БПЛА, достигает 1–2 см на пиксель, что на порядок превосходит детализацию традиционной съёмки с самолёта и в 40–50 раз превышает разрешение данных современного спутникового дистанционного зондирования.

Одним из основных результатов обработки аэрофотоданных методами фотограмметрии является, помимо создания координатно-привязанного ортофотопокрытия территории, возможность извлечь так называемую цифровую модель местности (DTM – digital terrain model) и цифровую модель (микро)рельефа (DEM – digital



Рис. 4.
Центральное городище Гнёздовского археологического комплекса
(Смоленская область)

elevation model). Модель местности отличается от модели рельефа присутствием наземных объектов: растительности, сооружений и т. д. Для выделения этих объектов из общего массива облака точек используются полуавтоматические алгоритмы классификации, дающие неплохой результат. Точность получаемых моделей (микро)рельефа была проверена в ходе наших работ на ряде памятников, где была возможность сравнить данные, извлечённые из аэрофотосъёмки, с качественными топографическими материалами, полученными традиционными способами. Расхождения высотных отметок, как правило, не превышают 3–7 см, что можно считать очень хорошим результатом.

4. Примеры выполненных работ

За последние два года нами проведены работы по аэрофотосъёмке с борта мультироторного БПЛА в составе научных и проектных археологических исследований на целом ряде памятников Центральной части и Юга России. Среди них Гнёздовский археологический комплекс (Смоленская область), городище и некрополь античной Фанагории, Елизаветинское городище (Краснодарский край), поселение Полянка (Крым) и другие. Высокодетальная аэрофотосъёмка была с успехом использована для

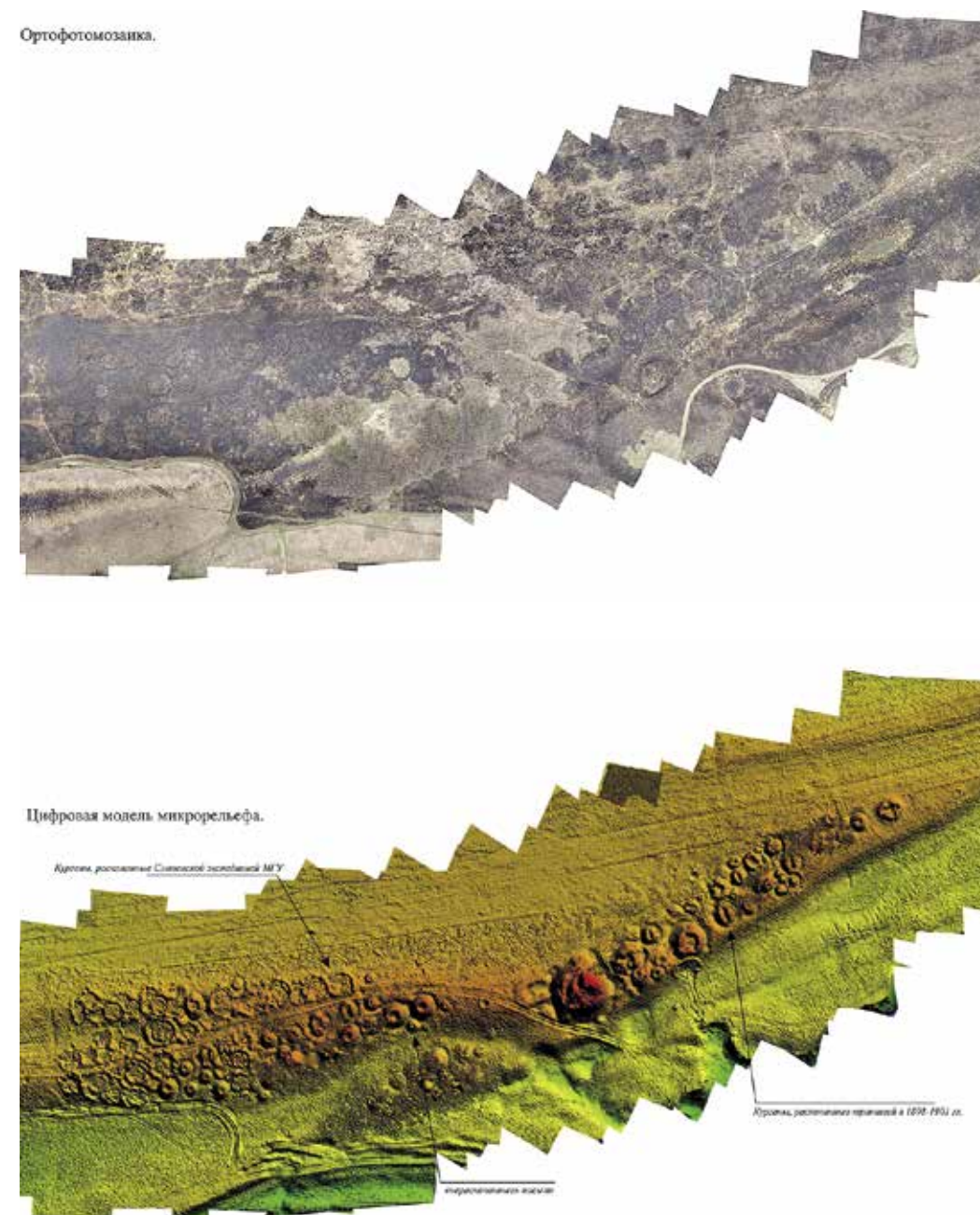


Рис. 5.
Гнёздовский археологический комплекс. Днепровская курганная группа.
Вверху – ортофотомозаика территории памятника.
Внизу – цифровая модель рельефа



Рис. 8.
Археологический комплекс античной Фанагории. Раскоп «Верхний город».
Перспективный аэрофотоснимок.
Ортофотоплан

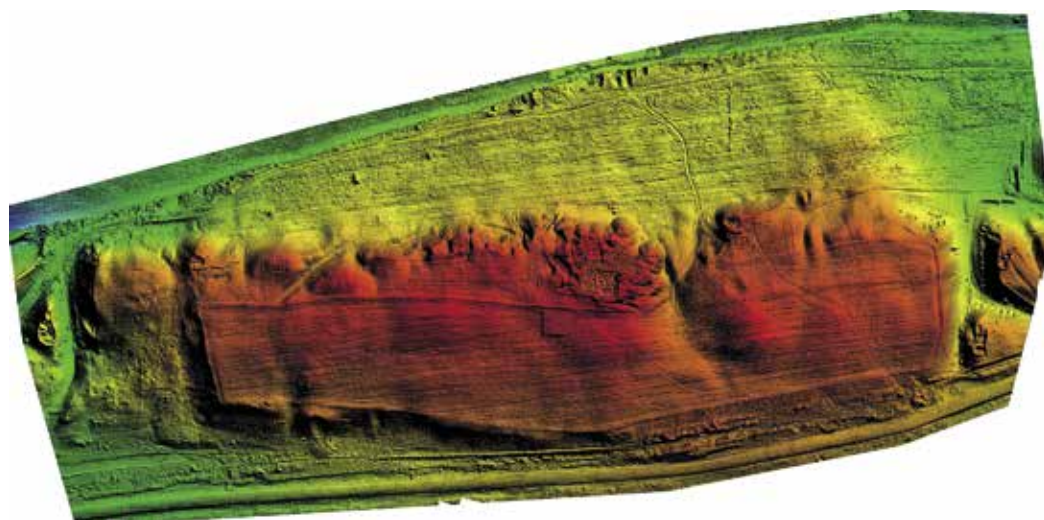


Рис. 6.
Археологический комплекс античной Фанагории. Ортофотомозаика городища.

Рис. 7.
Археологический комплекс античной Фанагории. Цифровая модель микрорельефа поверхности городища. Желтым и красным цветами маркирована граница распространения культурного слоя города

решения целого ряда задач: создания топографических планов и моделей микрорельефа поверхности памятников, разведочных изысканий и картирования археологических объектов, мониторинга современного состояния памятников археологии и их элементов, документирования археологических раскопок и создания сводных планов объектов, вскрытых в ходе многолетних полевых исследований. Все приводимые в статье материалы публикуются впервые.

Гнёздовский археологический комплекс. В рамках работ, произведённых на памятнике, была выполнена аэрофотосъёмка Центрального гнёздовского поселения (городища и части селища) и нескольких курганных групп могильника. Во всех случаях были построены цифровые модели микрорельефа отснятых территорий, оказавшиеся даже более информативными, нежели ортофотопокрывания, особенно в отношении курганных групп (рис. 5). Полученные данные позволили создать сводный план раскопок Центрального городища, отражающий результаты многолетних полевых исследований памятника (рис. 4). Цифровые модели поверхности курганных групп позволили, помимо создания детальных топографических планов, уточнить данные о количестве насыпей, их размерах и конфигурации, выделить курганы, раскопанные в разное время разными исследователями за последние 100 лет (рис. 5). При работе с материалами аэрофотосъёмки гнёздовских курганных групп, частично покрытых кустарниковой растительностью, были с успехом применены алгоритмы классификации точек и выделения элементов поверхности, закрытых растительностью.

Античная Фанагория. Работы в Фанагории носили комплексный характер. Было выполнено полное ортофотопокрывание территории городища площадью около 50 га с разрешением 1 см/пиксель (рис. 6). Созданная цифровая модель рельефа городища позволила не только уточнить конфигурацию и местоположение всех объектов



Рис. 9.
Археологический комплекс античной Фанагории. Раскоп «Верхний город»

на поверхности памятника (например, старых раскопочных траншей), но и сами границы распространения культурного слоя города, выраженные, за счет наличия в слое остатков архитектурных сооружений, в микрорельефе поверхности, однако не дифференцируемые иными неразрушающими методами (рис. 7). Помимо масштабных площадных работ, в Фанагории была произведена детальная съёмка центрального раскопа на городище («Верхний город»), исследуемого в настоящее время, с фиксацией остатков архитектурных сооружений, выявленных раскопками (рис. 8, 9).

Поселение «Полянка» (Крым). Продолжением работ по высокоточной аэрофотосъёмке археологических объектов, вскрытых в ходе многолетних полевых работ, стало создание ортофотоплана раскопанной части античного поселения (городища) «Полянка» в Ленинском районе Крыма. Проведённая съёмка, охватывающая площадь около 1 га с разрешением 0,3 см/пиксель, позволила создать сводный высокоточный архитектурно-археологический план городища (рис. 10).

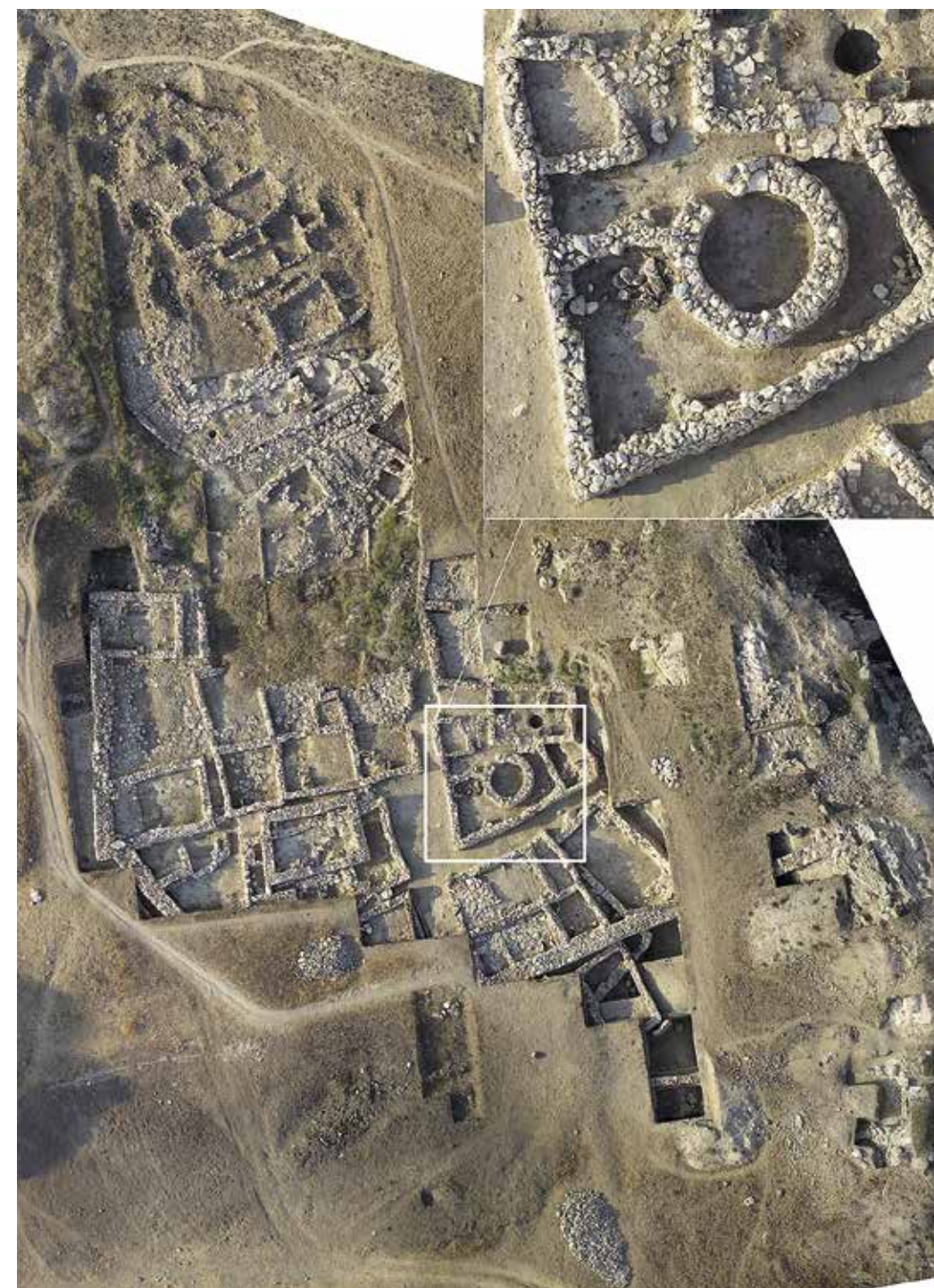


Рис. 10.
Поселение Полянка, Крым. Ортофотоплан раскопанной части памятника

Жуковский, 2012

Жуковский М. О. Использование данных спутников CORONA в археологических исследованиях // КСИА. 2012. № 226.

Zhukovsky, Pushkina, 2013

Zhukovsky M. O., Pushkina T. A. The Structure and Landscape Patterns of the Gnezdovo Necropolis // GEOMORPHIC PROCESSES AND GEOARCHAEOLOGY. From Landscape Archaeology to Archaeotourism. GEO-ARCHEOLOGIA. Periodico dell'Associazione Geo-archaeologica Italiana / ed. F. Angelelli. Vol ½. Pp. 301–304.

J.W.E. Faßbinder

LMU, Germany

A. Gass

Prussian Cultural Foundation, Germany

I. Hofmann

BLfD, Germany

A.B. Belinskij

ОАО “Nasledie”, Russian Federation

H. Parzinger

Prussian Cultural Foundation, Germany

EARLY IRON AGE KURGANS AND THEIR PERIPHERY:
LATEST FINDINGS AND INTERPRETATIONS
FROM THE NORTHERN CAUCASUS

Introduction

The steppe regions of the Northern Caucasus, which cover the areas of the Stavropol Region in Russia, contain thousands of large burial mounds – so-called “kurgans” of the Iron Age period. They form the visible legacy of this culture and were constructed by the Scythian nomads. Some hundreds of these kurgans are – simply because of their monumentality – defined as “great kurgans” and are ascribed to the elite of the horse riding nomads (Gass 2011, p. 59). Generally these great kurgans dominate large burial grounds and form visible landmarks in the steppe. In the western part of the Stavropol Region very few of these great kurgans have been archaeologically investigated in detail (Владимиров 1902; Маслов, Петренко 1998; Petrenko 2006; Канторович и др. 2007; Петренко, Маслов 2008). In the framework of Russian–German cooperation with the support of the “Exzellenz Cluster Topoi (Berlin), Program B-2-4” and the Geophysics Department of the Ludwig-Maximilians Universität, Munich, we started 2012 with a geophysical mapping project of selected sites for this region (Белинский и др. 2014; Гасс и др. 2014).

The eastern part of this large region of Stavropol (in total ca. 66,000 km²) remains until nowadays unexplored. Historical reports describe the northern foreland of the Great Caucasus Mountains as the starting point of the “heroic history” of Scythians, from where these horse riding nomads started their raids to the nearest areas (Herodot I. Pp. 103–106). Hence it can be assumed that the northern forelands of the Caucasus played an outstanding

strategic role in the organization of these raids. Since we knew only a little about the origin and the development of the Scythian culture we selected this region for our research project.

The main archaeological research questions are:

Were the Scythian nomads of the eastern part of the Caucasian forelands involved in the warlike operations of the horse riding nomads of the Eurasian steppe during the early Iron Age, who were acting from southern Siberia in the east to the upper Danube River in the west? And what was the role of these nomads in this region? What was the burial ritual of the people and where and how do the accompanying constructions and features in the Scythian burial mounds and graveyards of this region look like?

The answer to the first question can be found with pure archaeological research only. The second question points to the discovery of possible findings in the periphery of the great kurgans. Beside the topographical visible features such as ring ditches, ramparts and stone settings, geophysical prospecting allows us to uncover the hidden features beneath the ground. Clarification of the layout and an overall picture of such a vast necropolis can be best achieved with large scale magnetometer prospecting. Valuable information can be found not only beneath the great kurgans but also with detailed surveying in the adjacent environment, the periphery of these large kurgans (Nagler 2013, p. 618). Basically there we would expect to find the traces of complex rituals that took place before, during and after a burial ceremony. In the periphery of the kurgan we can also expect to find further burials, architectonic constructions, secondary burials, grave goods, offering places, as well as traces of ceremonial acts and feasts. Such findings were already reported from many sites of the Eurasian steppe belt from southern Siberia, (e. g. Kurgan Aržan 2 in southern Siberia/Курган Аржан 2 – Čugunov et al. 2010; Faßbinder & Becker 2010), and the necropolises Žoan Tobe and Tört Oba in southeastern and western Kazakhstan (Могильники Жоан Тобе и Төрт-Оба – Самашев и др. 2009; Гасс 2011. Рр. 67–68; Faßbinder et al. 2009; Gorka, Faßbinder 2011; Faßbinder et al. 2013). We had already found such constructions with magnetometer surveys at the necropolis at Vinogradnyj-1 in the Northern Caucasus (Белинский и др. 2014, p. 84, ill.1) as well as on a kurgan of Alexandropol in the Ukraine (Александропольский курган – Полин, Дараган 2010).

Magnetometer prospection

For large scale prospecting we used the cesium total field magnetometer in the so-called duo-sensor configuration, which allows us to reduce the diurnal variations of the earth's magnetic field and thus use the instrument in its full range of sensitivity. The crucial factor for the use of this type of instrument however is the tolerance towards a tilting of the instrument, and more so when we want to apply the prospecting technique on uneven and rough terrain like a kurgan field with monuments of considerable size and steep slopes (Faßbinder 2009).

Results

Interesting results were achieved and important new information discovered from a magnetometer survey of the kurgan field named Zunkar-2 in the Nogai steppe of the Terk-Kuma depression (eastern Stavropol Region). The necropolis is situated on a spur that is aligned in the north-south direction and in a safe position with respect to the annual floodwaters in the area. The necropolis consists of three kurgan rows that are aligned and directed north-south. Every row or chain of kurgans consists of at least five mounds. The

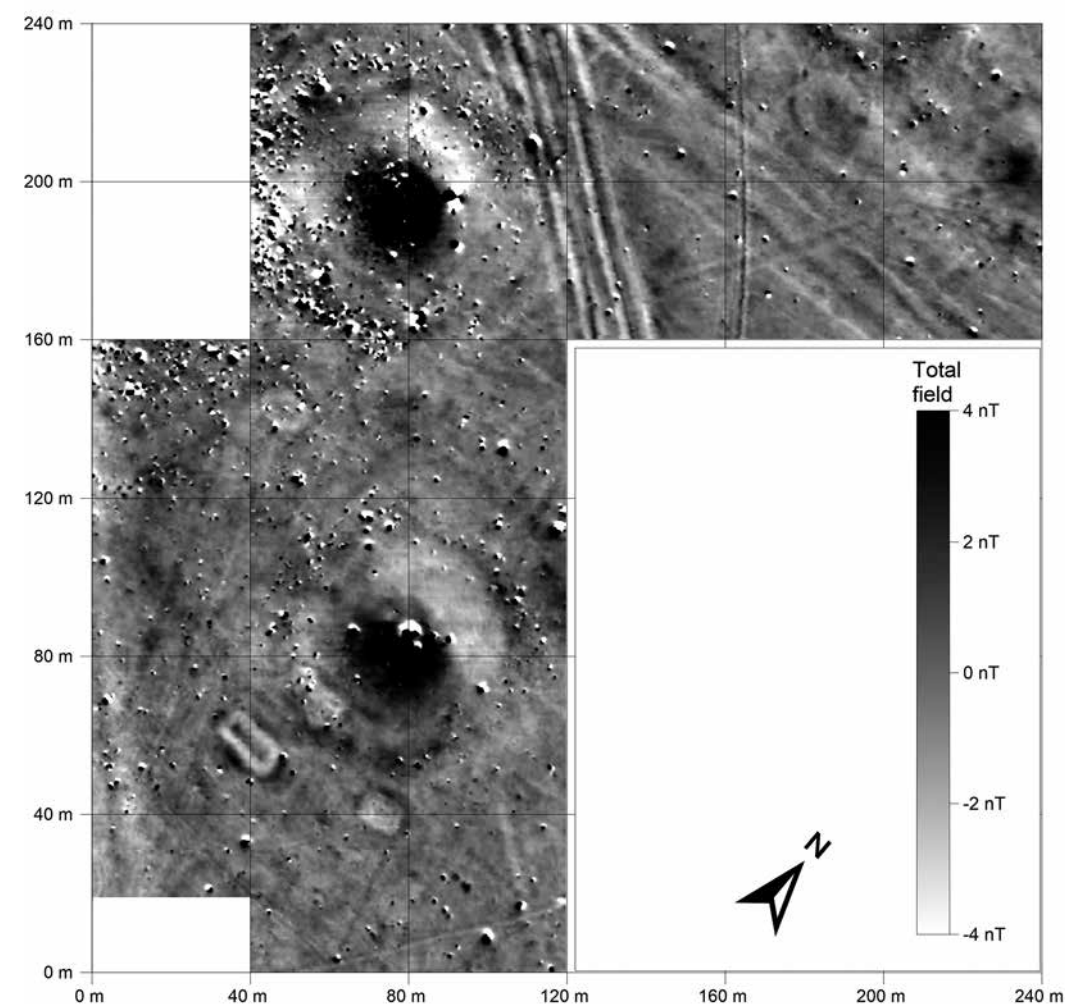


Fig. 1.
Zunkar-2. Magnetogram of the early Iron Age necropolis and the adjacent periphery. Magnetometer survey with Smartmag SM4G-Special cesium-magnetometer, sensitivity ± 10 pT, variometer (duo-sensor) configuration, 40×40 m grid, spatial resolution 12.5×50 cm, interpolated to 25×25 cm, total intensity of the earth's magnetic field: ca. $50,200 \pm 30$ nT (May 2014), dynamics ± 4 nT, grey shade plot in 256 greyscales from positive (black) to white (negative). Processed by reduction to a square mean value. (Magnetogram: Jörg Faßbinder, Ina Hofmann)

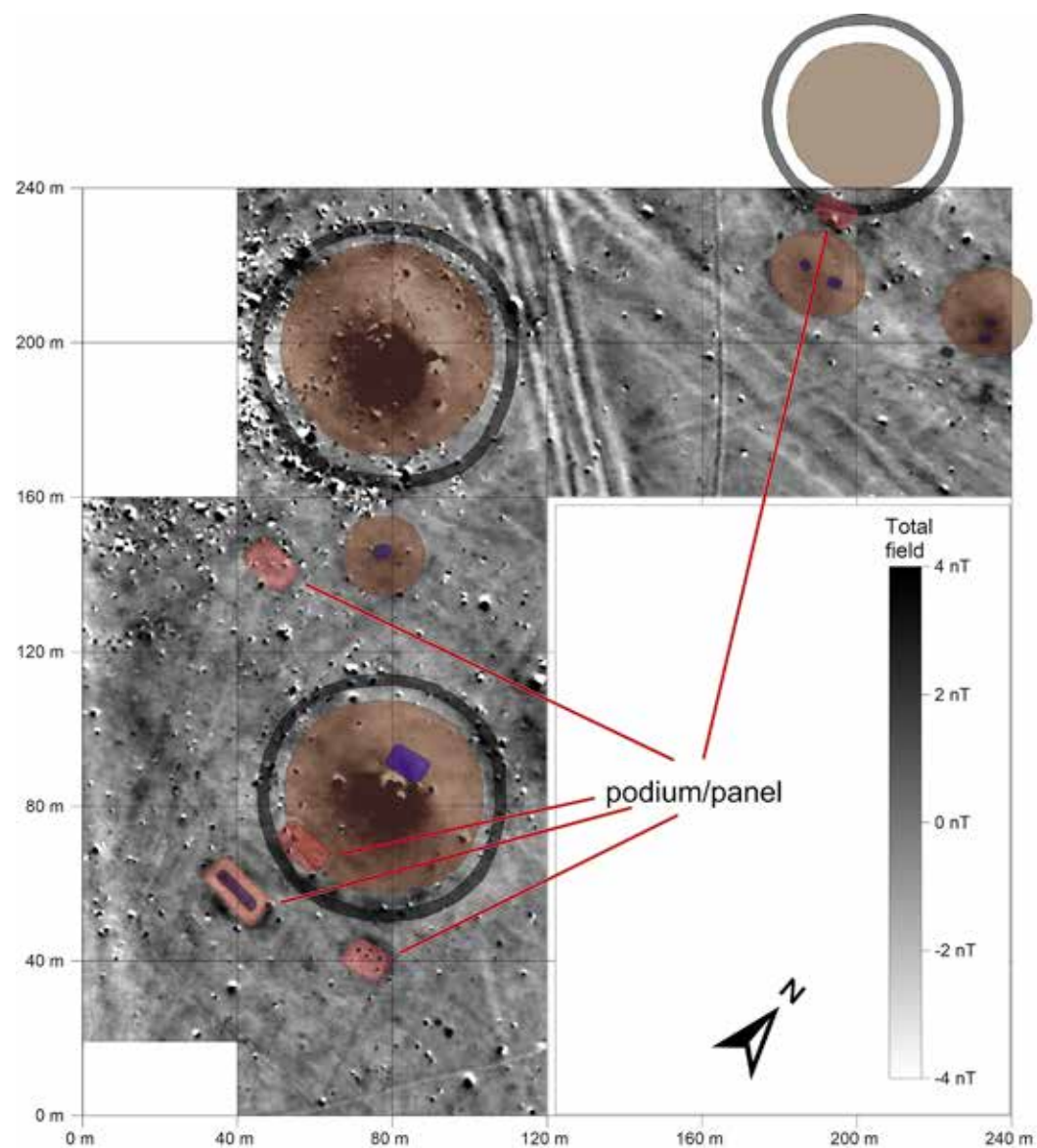


Fig. 2.
Zunkar-2. Magnetogram and interpretation map of the early Iron Age necropolis and its periphery. A simplified interpretation map given as overlay marks: visible kurgans (brown), ring ditches and burial chambers (blue and dark) and the square-shaped features, probably a podium or panel in red. (Geophysical interpretation: Jörg Faßbinder)

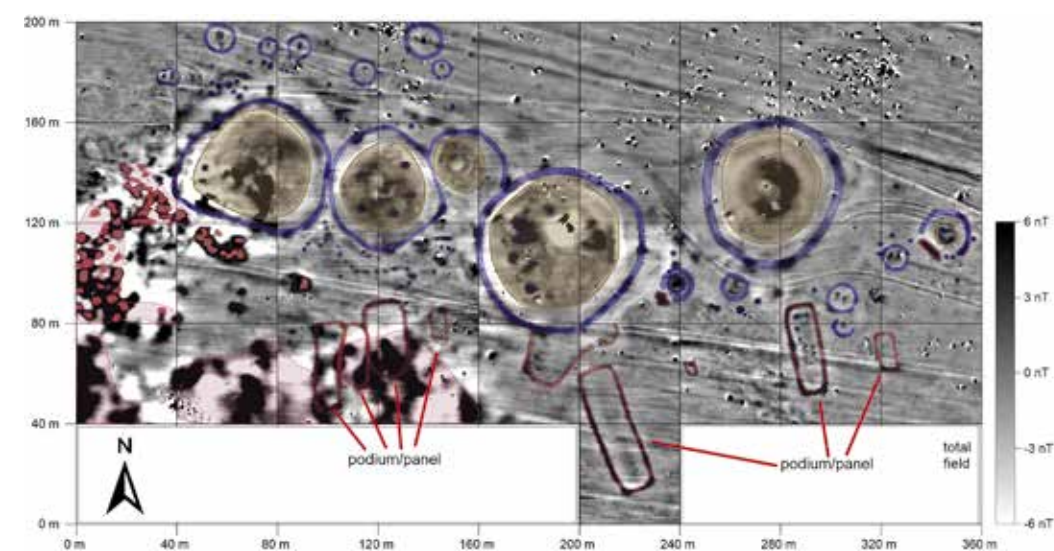


Fig. 3.
Tört Oba. Magnetogram: Smartmag SM4G-Special cesium-magnetometer, sensitivity ± 10 pT, variometer (duo-sensor) configuration, 40×40 m grid, spatial resolution 12.5×50 cm, interpolated to 25×25 cm, total intensity of the earth's magnetic field at the site in May 2011: $ca. 53,570 \pm 30$ nT, dynamics ± 6 nT, grey shade plot in 256 greyscales from positive (black) to white (negative), processed by reduction to a square mean value. A simplified interpretation map as overlay marks: visible kurgans (brown), ring ditches and burial pits (blue and dark), fireplaces and heated pits, pits which contain highly magnetic ashes and the square-shaped features in red. (Magnetogram: Jörg Faßbinder, Tomasz Gorka; interpretation map: Jörg Faßbinder)

largest kurgans have heights of 2.5 to 7.0 m, are found in the middle row, and the highest of them is in the north. All these great kurgans have a typical form with a flattened dome, three steep slopes and a dip slope on the southern side.

A power transmission line cuts across the northern part of the kurgan row and has a significant influence on the magnetometer readings. Thus we concentrate our survey on the southern part of the necropolis.

The magnetogram reveals, first of all, ring ditches around the kurgans, some further little kurgans and single irregular sized pits (Figures 1, 2). Most interesting however was the finding of rectangular features in the south of the two great kurgans. Oriented north-west south-east and about 10×15 m and 10×20 m in size, they resemble similar constructions that were found in western Kazakhstan on the kurgan field of Tört Oba and Besoba (fig. 3).

The archaeological site Tört Oba and Besoba was surveyed with the same magnetometer technique, in a joint Kazakhstan–German cooperation during the year 2010. The rounded and square-shaped structures from Tört Oba and Besoba varied a lot in size but in their orientation they point with the narrow side towards the kurgan, while at the Zunkar site they are all orientated with the broadside towards the kurgan. But without exception, all of them were exposed in the south of the kurgans.

For a better understanding of the findings an archaeological excavation of one of these so far unknown features was undertaken in Tört Oba. The final publication of this

excavation is still in preparation, but it turned out that the features are ritual places where some feasting ceremonies and offerings took place.

The excavated rectangular feature (object 4) was 39 × 13 m in size and occurs in the topography as a slight elevation (10–20 cm). The surrounding ditch had a depth of 1–1.8 m and at the base it was 1 m wide. At some parts there were found bones of animals. After a short usage the ditch was obviously refilled with black earth. The fact that no pottery shards or waste were found there, and that the feature was in use only for a short time, points strongly to the interpretation as an offering place. The object dates to the same archaeological period of the great kurgans, and radiocarbon dates of the Poznan laboratory point to the 7th – 5th century BC (early Iron Age, early Saka period).

Our archaeological considerations support the thesis of other archaeologists who claimed that the direction of propagation of the Scythian–Sakian culture runs from the east to the west. Hence the origin of the Scythian culture dates to the 9th and 8th century BC in southern Siberia (Republic of Tuva, Kurgan Aržan 1), and propagates via Kazakhstan, middle Asia, southern Ural to the Northern Caucasus region during the 7th century BC and further on to the Ukrainian steppe to the Karpate basin (Мозолевский, Полин 2005. Pp. 19–20, 207–211, 411–412; Parzinger 2013, p. 539).

Due to our geophysical findings and on the basis of similarities with the layout and the orientation of the features of western Kazakhstan and the Northern Caucasus we propose that the purpose of these constructions follows similar rituals and traditions of the same culture. With our measurements in the Northern Caucasus we found only one possible rare case in history which exemplifies such ritual conventions that occur accidentally and independently in both regions. Further research, test excavations and further case histories with the same results may clarify, confirm, or reject this theses.

References

Белинский и др. 2014

Белинский А.Б., Парцингер Г., Гасс А., Фассбиндер Й. Исследования больших курганов эпохи раннего железного века Северного Кавказа и их периферии с применением магнитометрии // Труды IV (XX) Всероссийского археологического съезда в Казани 2014 г. Казань, 2014. Т. 2. С. 83–87.

Владимиров 1902

Владимиров И.А. Ставропольская губерния // Отчет Императорской Археологической комиссии за 1900 год. СПб., 1902. С. 49–53.

Гасс 2011

Гасс А. К проблеме изучения памятников раннего железного века Юго-Восточного Семиречья в свете данных геоархеологических исследований // Археология, этнография и антропология Евразии, 2011, 3(47). С. 57–69.

Гасс и др. 2014

Гасс А., Фассбиндер Й., Белинский А., Парцингер Г. Исследования периферии больших курганов РЖВ Северного Кавказа с применением магнитометрии // Е. И. Крупнов и развитие археологии Северного Кавказа. XXVIII Крупновские чтения: материалы Междунар. науч. конф. Москва, 21–25 апреля 2014 г. Москва, 2014. С. 139–142.

Канторович и др. 2007

Канторович А.Р., Петренко В.Г., Маслов В.Е. Раскопки кургана раннескифской эпохи у г. Новопавловска (предварительная публикация) // Материалы по изучению историко-культурного наследия Северного Кавказа. Вып. VII: Археология, палеоантропология, краеведение, музееведение. М., 2007. С. 168–207.

Маслов, Петренко 1998

Маслов В.Е., Петренко В.Г. Курганы № 12 могильника Новозаведенное II // Материалы по изучению историко-культурного наследия Северного Кавказа. Вып. I: Археология. Ставрополь, 1998. С. 210–227.

Мозолевский, Полин 2005

Мозолевский Б.Н., Полин С.В. Курганы скифского Герросса IV в. до н. э. Киев, 2005. С. 599.

Петренко, Маслов 2008

Петренко В.Г., Маслов В.Е. Исследования Новозаведенского II могильника // Материалы по изучению историко-культурного наследия Северного Кавказа. Вып. VIII: Крупновские чтения 1971–2006. М., 2008. С. 584–588.

Полин, Дараган 2010

Полин С.В., Дараган М.Н. Работы на Александропольском кургане в 2008 г. // SYMBOLA 1. Античный мир Северного Причерноморья. Новейшие находки и открытия. М., 2010. С. 187–205.

Самашев и др. 2009

Самашев З., Наглер А., Парцингер Г., Наврот М. Совместные германо-казахстанские исследования больших сакских курганов Семиречья // Пятая Кубанская археологическая конференция: материалы докладов. Краснодар, 2009. С. 350–352.

Čugunov et al. 2010

Čugunov K.V., Parzinger H., Nagler A. Der skythenzeitliche Fürstenkurgan Aržan 2 in Tuva // Archäologie in Eurasien 26. Steppenvölker Eurasiens 3. Mainz am Rhein, 2010. Pp. 495.

Faßbinder 2009

Faßbinder J.W.E. Geophysikalische Prospektionsmethoden – Chancen für das archäologische Erbe, in Tocare – Non Tocare. München : Siegl, 2009. Vol. 47. Pp. 10–32. (ICOMOS, Hefte des Deutschen Nationalkomitees)

Faßbinder et al. 2009

Faßbinder J.W.E., Gorka T., Parzinger H., Nagler A. Magnetic prospecting of Scythian kurgans from Chilik, Southeastern Kazakhstan // ArcheoSciences, revue d'archéometrie, suppl. 33. 2009. Pp. 59–61.

Faßbinder, Becker 2010

Faßbinder J.W.E., Becker H. Magnetometerprospektion // K.V. Čugunov, H. Parzinger, A. Nagler. Der skythenzeitliche Fürstenkurgan Aržan 2 in Tuva // Archäologie in Eurasien 26. Steppenvölker Eurasiens 3. Mainz am Rhein, 2010. Pp. 19–21.

Faßbinder et al. 2013

Faßbinder J.W.E., Gorka T.H., Nagler A., Chemyakina M.A., Molodin V.I. Prospecting of kurgans by magnetometry: case studies from Kazakhstan, Siberia and Northern Caucasus. Виртуальная археология (неразрушающие методы исследований, моделирование, реконструкции): материалы Первой Междунар. конф., состоявшейся в Государственном Эрмитаже 4–6 июня 2012 г. Saint Petersburg, 2013. Pp. 50–57.

Gass 2011

Gass A. Early Iron Age burials in Southeastern Zhetysu: the geoarchaeological evidence // Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia 39(3). 2011. Pp. 57–69.

Gorka, Faßbinder 2011

Gorka T., Faßbinder J.W.E. Classification and documentation of Kurgans by magnetometry // Proceedings of the International Conference on Archaeological Prospection. Izmir. Pp. 183–186.

Herodot

Herodot (Übersetzung von H. Stein). Neun Bücher der Geschichte. Gütersloh : Klio, 1984.

Nagler 2013

Nagler A. Grabanlagen der frühen Nomaden in der eurasischen Steppe im 1. Jahrtausend v. Chr. Unbekanntes Kasachstan. Archäologie im Herzen Asiens: Kat. der Ausst. des Deutschen Bergbau-Museums Bochum vom 26. Januar bis zum 30. Juni 2013. Bochum, 2013. Bd. II. Pp. 609–620.

Parzinger 2013

Parzinger H. Die Reiternomaden der Skythenzeit in der Eurasischen Steppe . Unbekanntes Kasachstan. Archäologie im Herzen Asiens: Kat. der Ausst. des Deutschen Bergbau-Museums Bochum vom 26. Januar bis zum 30. Juni 2013. Bochum, 2013. Bd. II. Pp. 539–553.

Petrenko 2006

Petrenko V.G. Krasnoznamenskii Burial-ground. Early Scythian Elite Burial-mounds in the Northern Caucasus. Corpus tumulorum scythicorum et sarmaticorum I. Steppenvölker Eurasiens 2. Berlin, Bordeaux, Moscow, 2006, 176 pp, 126 pls.

A. Asăndulesei

University of Iași, Romania / LMU, Germany

N. Cristi, M. Asăndulesei

University of Iași, Romania

ARCHAEOLOGICAL PROSPECTION AND NATURAL RISK MANAGEMENT IN PREHISTORIC SITES FROM EASTERN ROMANIA. A CASE STUDY: SETTLEMENT FROM COSTEȘTI, CIER (IAȘI COUNTY, ROMANIA)

1. Introduction

The work is based on an elaborated study, started in 2009 and still under way, conducted by the Arheoinvest Platform from the Interdisciplinary Research Department – Field of Sciences within the Alexandru Ioan Cuza University of Iași. The main objective of this endeavour – in the initial stage and to which all subsequent activities were inherently subsumed – is to produce by means of non-intrusive investigation techniques an ample characterization of the archaeological site from Costești (Iași County) known in the dedicated literature as *Cier* or *La școală* (RAJI II 1985, p. 418). Specifically, the investigations sought to produce a detailed assessment of the current state of the site and the adjoining areas, and a comprehensive report suitable for elaborating an adequate research strategy and for inclusion in a long-term management plan. The methodology consisted primarily of archaeological topographic surveying, terrestrial laser scanning, air photography, and geophysical prospections. The present paper contains the most important results achieved so far, some preliminary, obtained through a multi-faceted interpretation of data with state-of-the-art research tools.

2. Characterization of the study area

The site studied in this paper is well known to the archaeological community from Romania. Earlier studies, some of which carried out in the interwar period, attested a rich material belonging to the chalcolithic Cucuteni culture (A3, A-B2/B1), two from the transition to the Bronze Age period (Horodișteea-Erbiceni II) and early medieval (8th – 9th/10th centuries) habitation levels, as well as two necropolises, one Horodișteea-Erbiceni II and the other medieval. The site is located in the northeastern part of Romania, in the Iași County, on the right side of the upper course of the Bahluiet River (ca. 10 km from the source), in a meander within the fossil valley of the creek (figs. 1, 3), on the back side with western exposure of the cornice, successively detached toward the east–north–east, from the Pietrișul hill, and which evolved in various stages (fig. 2). Initially, the site was pentagonal, with rounded corners, being delimited to the west and south-west by a fossil riverbed of the Bahluiet (Ciurea 1938; Boghian et al. 2013, p. 199).

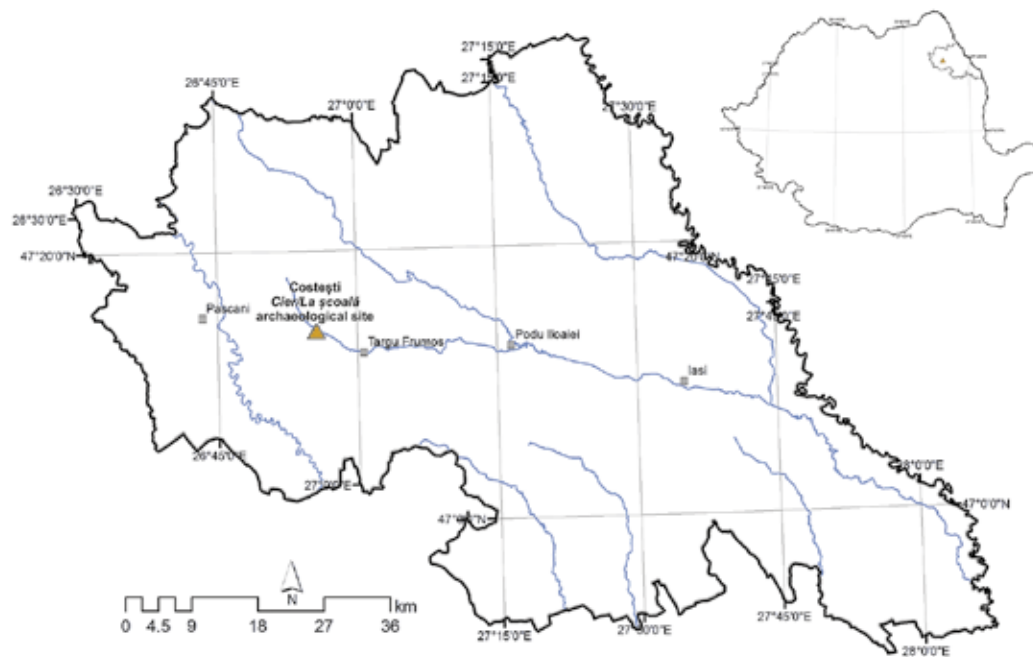


Fig. 1.
Location of the site within Romania and Iași County

3. Methodological aspects

As mentioned in the introduction of this contribution, our study is based on the application of one of the most important methods of non-destructive archaeological prospection; we also interpreted the results obtained independently for each method used, in a GIS (Geographic Information System) environment. When it comes to this type of research, a corresponding methodology requires – when all conditions are met – the appeal to complementary non-invasive methods; it is well known that each of these investigation possibilities has both advantages and limits.

3. 1. Cartographic analysis

After identifying the site from Costești in the field and charting its GPS coordinates, we began our investigation, naturally, by analyzing the available cartographic support. At the beginning, all map portions were geo-referenced on various scales, corresponding to the area of study, and they were overlapped in the GIS. Military topographic maps (scale 1:25000), topographic plans (scale 1:5000), map sheets (scale 1:20000), and orthorectified aerial images (scale 1:5000) were used. We also used a draft from the year 1937, comprising the plan of archaeological excavations conducted here by Professor Vasile Ciurea; the results of the research campaign were published, one year later, in the journal of the Fălticeni museum (Ciurea 1938). Unfortunately, this draft is very general; its geo-referencing by correspondence is approximate, because we failed to identify clear common points between it and the rest of the digital cartographic support.

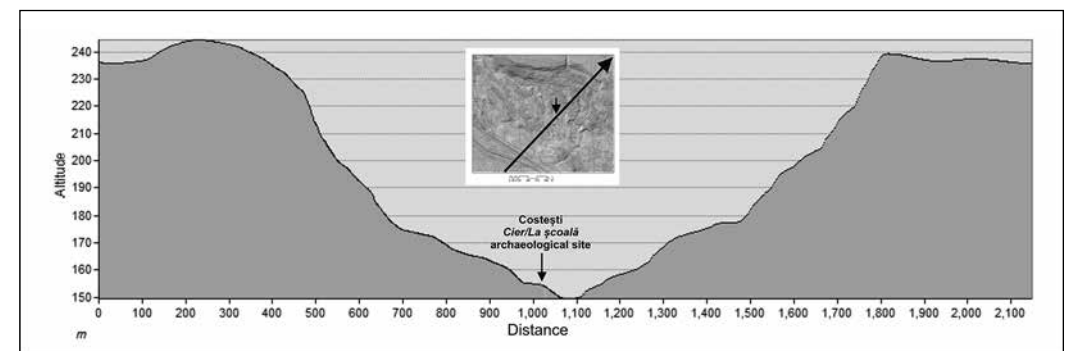


Fig. 2.
Aerial photography from the northwestern part of the site
Fig. 3.
SV-NE cross section through the valley of the Bahluiet River

3. 2. Terrain microtopography analysis

The detailed registration and the field microtopography analysis have represented a priority for our activities for two reasons. On the one side, based on several other successful research projects of our team (Asăndulesei et al. 2013; Bem et al. 2013), we aimed at obtaining a clear image of the degree of the site destruction. On the other, in numerous cases, a minute interpretation of the analysis can provide significant clues to the buried archaeological structures.

Therefore, by using a Leica GPS system (base station and mobile device), we registered a dense network of geodesic points – for both the site surface and the surrounding areas – within the national system of coordinates. In addition, for the inaccessible sector, highly affected by river erosion, we used a three-dimensional laser scanning equipment, which enabled us to obtain a 5-cm resolution of the section in question (fig. 6a). Our team had used successfully this registration method – which has the maximum accuracy of field topography, through the three-dimensional model obtained – before it was used for other case studies (Asăndulesei 2011; Romanescu et al. 2012a; Romanescu et al. 2012b). This method proved to be very useful, especially when it came to monitoring erosion rate. After processing the GPS data, we obtained a detailed numerical field model,

with 0.5 m/pixel resolution (fig. 7), to the end of representing accurately the exterior shape of the site and of pinpointing potential characteristics of archaeological nature.

3.3. Oblique aerial photography

It is well known that aerial photography is a branch of remote sensing, a non-destructive method used for identifying, photographing, mapping, and interpreting traces that indicate the presence of ancient anthropic characteristics (Oberländer-Târnoveanu, Bem 2009). Though the history of aerial photographs with archaeological purposes has a 100-year old international tradition, in Romania, the initiatives in this field can only be characterized as isolated.

Archaeological characteristics of aerial images can be identified due to shadows, differences in soil pigment, moisture, or marks detectable in snow or in agricultural cultures (Scollar et al. 1990). It is unusual for a single photograph to provide all the information about a site or an entire area, irrespective of the type of archaeological research. The visibility of marks depends on the change in the direction and height of the sun, even for sites visible above the ground, because deep shadows often mask the information. The season when people take the photographs is equally important, because archaeologists elaborate maps based on aerial images, at various moments during the day and the year, in order to get as much information as possible on the researched objective (Palmer 2009).

For the Costești site, we took aerial photographs from a small airplane, by using a Nikon camera (model D300), between 3 and 5 PM, on April 28, 2012. The mean altitude from which we took the photos is 500 m, and the photo angle was approximately 45°; we took over 30 photos from all directions.

3.4. GPR (Ground-Penetrating Radar) measurements

GPR technology has been highly appreciated by the archaeological community because of its capacity to identify and represent accurately the characteristics buried in the ground. It has a reputation as one of the most complex geophysical methods applied in archaeology because it involves collecting large amounts of data and generating an impressive 3D database. The capacity of producing images at different depths, the sometimes delicate interpretation of the data, and the difficulty in correlating them in many profiles within a grid are just some of the aspects that make GPR a difficult venture (Conyers, Goodman 1997). In addition, field conditions (perturbing factors) represent another criterion for obtaining viable results. The ability of providing more precise information than other prospecting methods, related to the depth of archaeological remains, is of great interest to archaeologists, who can really use data on various planes and depths. Despite the data collecting process on sections in depth, the main advantage of the GPR is its ability of providing a three-dimensional image of the prospected archaeological site when several sections are registered (Leckebusch 2003).

The success of GPR measurements in archaeology depends, to a certain extent, on the buried characteristics, on soil topography, and on vegetation. Despite the multitude of factors susceptible to influencing measurements, GPR is still very useful especially where an electrical resistance contrast is identified. This is not a method to apply immediately in all geographic or archaeological contexts but, with slight modifications in data acquiring methodology, it can adapt to a variety of working conditions (Gaffney, Gater 2003).

For the archaeological site of Costești, we used a Mala, Ramac X3M GPR system. Initially, we conducted multiple tests with various antennas; finally, for our measurements, we

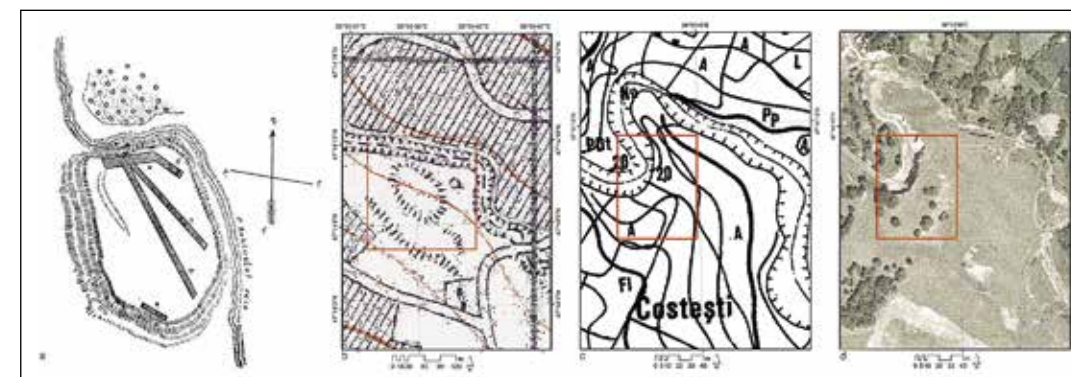


Fig. 4.
Costești archaeological site evolution (cartographic analysis):
a) excavations plan from year 1937;
b) topographic map from the year 1957 (scale 1:20000);
c) topographic map from the year 1975 (scale 1:5000);
d) orthorectified image from the year 2005 (www.ancpi.ro)

chose the antenna with 500 MHz frequency. Depending on the area accessible from the site surface, we made two grids with different sizes (grid A=20 × 47 m and grid B=20×20 m). We took the measurements through parallel lines, in one direction, with a 0.5-m distance between them. GPR scans for grid B were made transversally on grid A, in its north section, to obtain more information for this area (fig. 9a).

4. Results and discussion

4.1. Cartographic support analysis

The field research conducted near the site by the members of our interdisciplinary team (geomorphologists, hydrologists and, of course, archaeologists from the Alexandru Ioan Cuza University of Iași) comprised several phases. In the first phase, we studied carefully the current state of the site, focusing on its degree of degradation. From that moment on, we began taking successive measurements for monitoring the site erosion rate. We also tried to assess as accurately as possible the initial surface of the site. Therefore, a simple cartographic analysis revealed that the current site is the third part of the initial site; the strong erosion provoked by the Bahluiet River destroyed the rest (Figures 4, 5). It is obvious that the river began eroding the site even before 1937, as posited by Professor Ciurea in the aforementioned work. At the same time, though the resolution is not very high, the map fragment extracted from the map sheets, scale 1:20000, shows that the site surface is not considerably altered compared to the year 1937: the shape of the mound is almost pentagonal. In 1975 – a year for which we have a topographic plan under a much larger scale (1:5000) – the situation was very different. Based on comparative analyses, we can state that nowadays the site is approximately 50% destroyed.



Fig. 5.
Old archaeological excavations (after S. Ignătescu) and site boundary (year 1937)

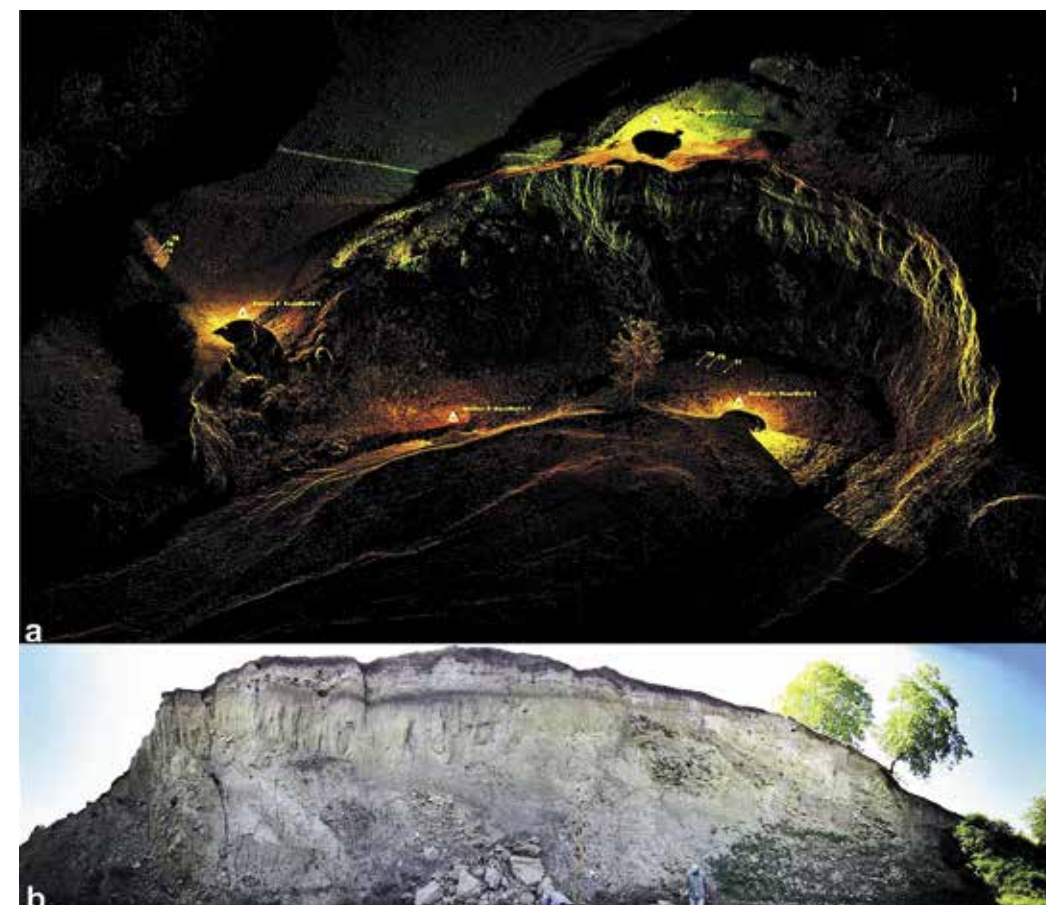


Fig. 6.
a) 3D terrestrial laser scanning of eroded sector of site;
b) panoramic picture of the same sector

4. 2. Background – geo-referenced aerial image.

The strong deterioration of the site – which occurred within the aforementioned time-frame – and the subsequent alterations could be related to an increased hydrological regime during this period for the microregion to which our study case pertains. Furthermore, the archaeological digs conducted on this site over time have contributed to its degradation (figs 6a, b).

4. 3. Terrain microtopography analysis

It was mandatory and very necessary to obtain a digital terrain model by conducting a minute topographic survey, in the context of non-destructive measurements proposed for this study case. The survey was actually the foundation of our study; this is the baseline for all the other products resulted from the analysis and interpretation of the main investigation methods.

Persuaded by the utility of this working phase, we initiated a detailed analysis of the digital model, which provided us with valuable data on the old, abandoned river courses near the site, on the fortification system of the site, or with clues on the landform configuration

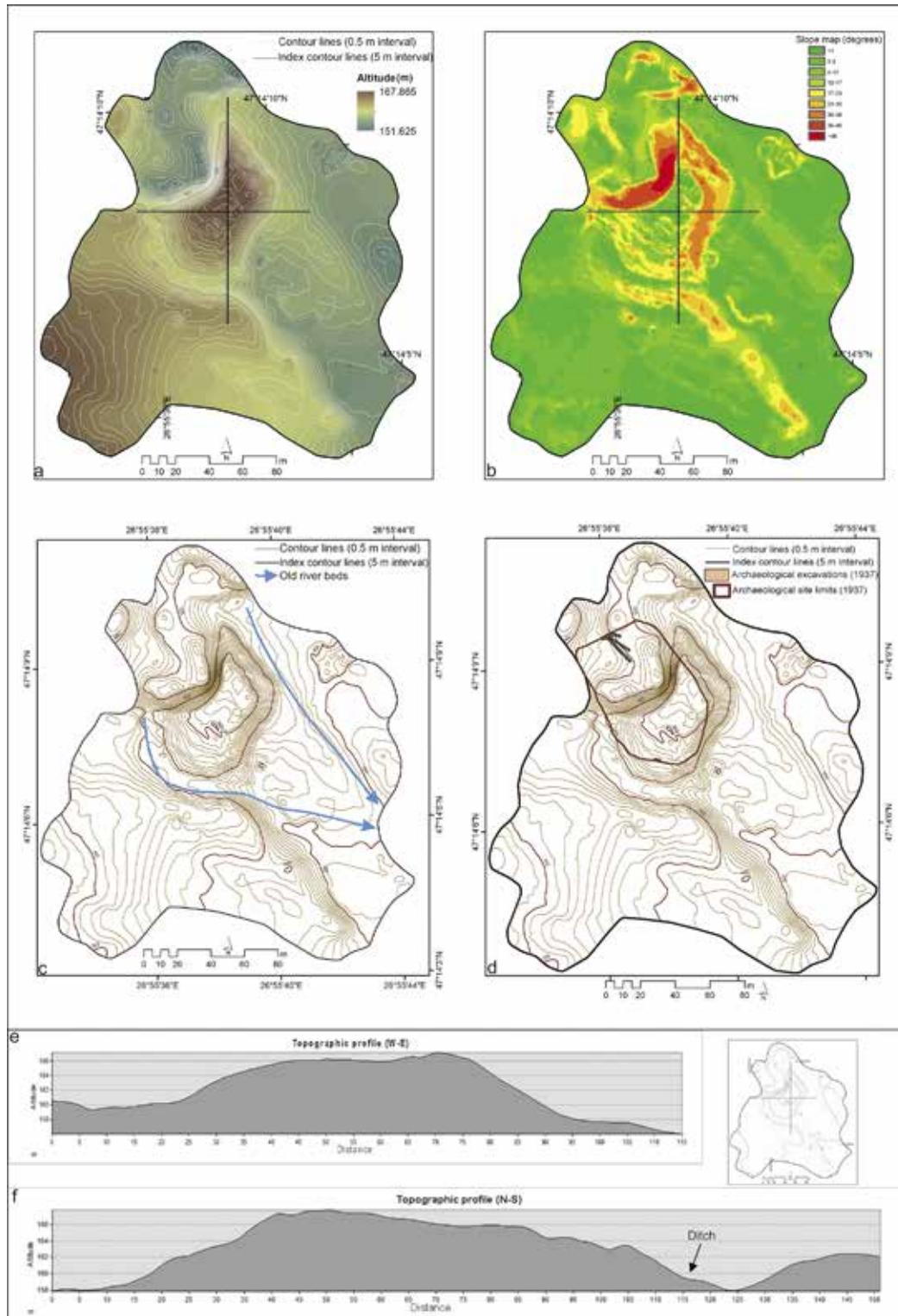


Fig. 7.
a) Hipsometric map; b) slope map; c) topographic map and the old river beds;
d) old excavation tranches and site limit from the year 1937, overlaid on topographic map;
e, f) west–east and north–south cross sections of the site



Fig. 8.
Interpretation of aerial photography

(which gave the inhabitants a strategic advantage, beyond any doubt). Therefore, by analyzing the images below and by permanently consulting the other results, we were able to trace easily an approximate trajectory for the old courses of the Bahluiet in this area (fig. 7c).

It appears that, at a certain point, one of these streams bordered the site on the south and the southwest; in another period, the stream would have followed the northern side of the site, on a northwest–southeast direction. Obviously, the inhabitants made the most of this positioning, by building a fortification system based on the advantage provided by the abandoned fossil riverbed with the southwest origin. Moreover, they made a semicircular defence ditch to consolidate the entire southern part of the site; we observed this ditch in both the topographic survey and the aerial photographs and GPR measurements (Figures 7, 11). The advantage of the position for the site inhabitants is also shown by the steep slopes of this mound, distributed on all its sides, with values up to 36° (fig. 7b). The holes on the site surface – visible in the model – were most probably caused by poachers or by the inhabitants of the current village, who used to extract clay from this area. Besides the aforementioned aspects, the detailed topographic survey and the three-dimensional scanning represented the cartographic support for aerial photographs and GPR measurements, thus contributing directly to an accurate interpretation of the detected structures and to a better understanding of the situation as a whole.

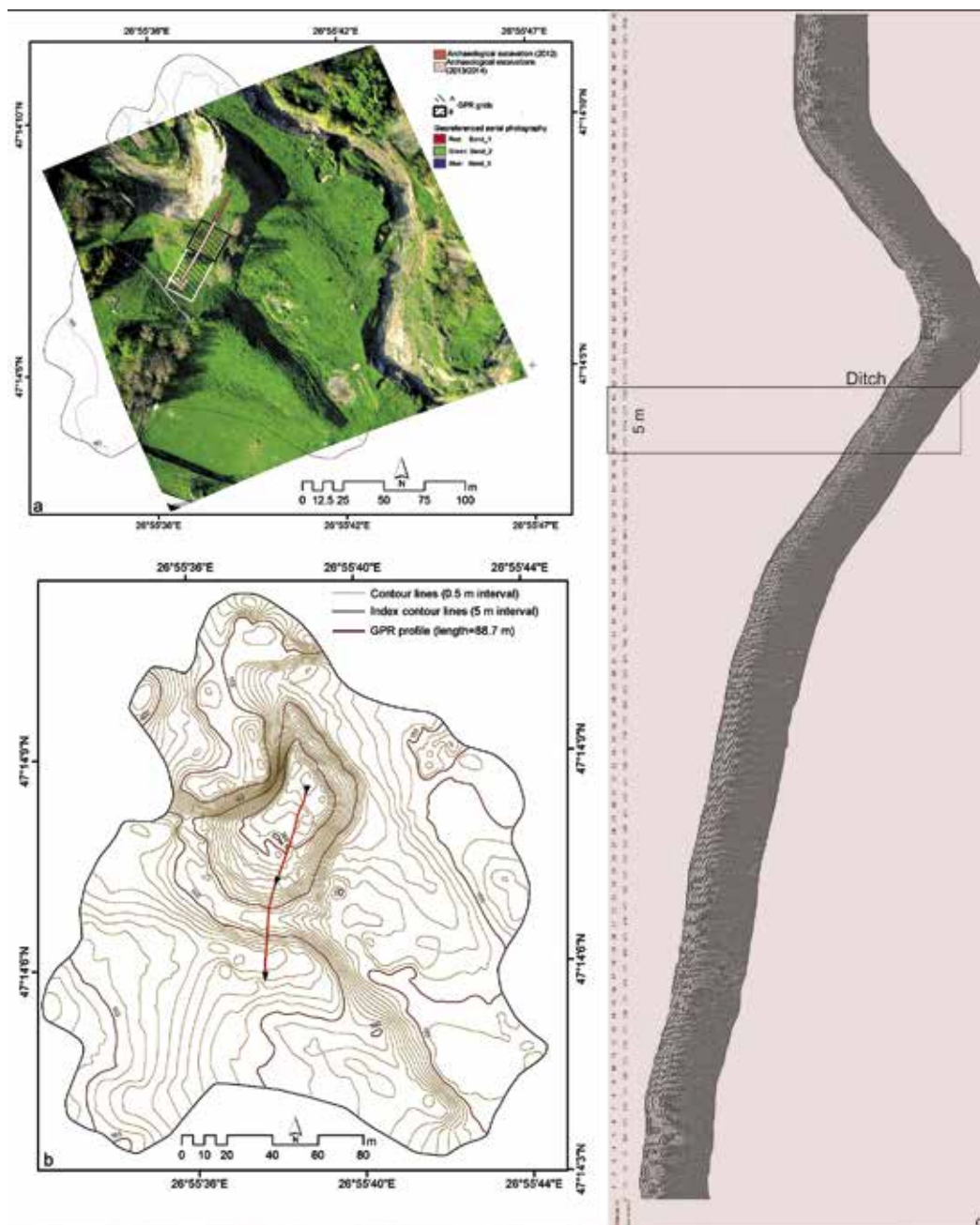


Fig. 9.
a) GPR survey areas and archaeological excavations (years 2012–2014);
b) topographic map and longitudinal GPR profile path (red line);
c) GPR profile (red line from 9b) with topographic corrections

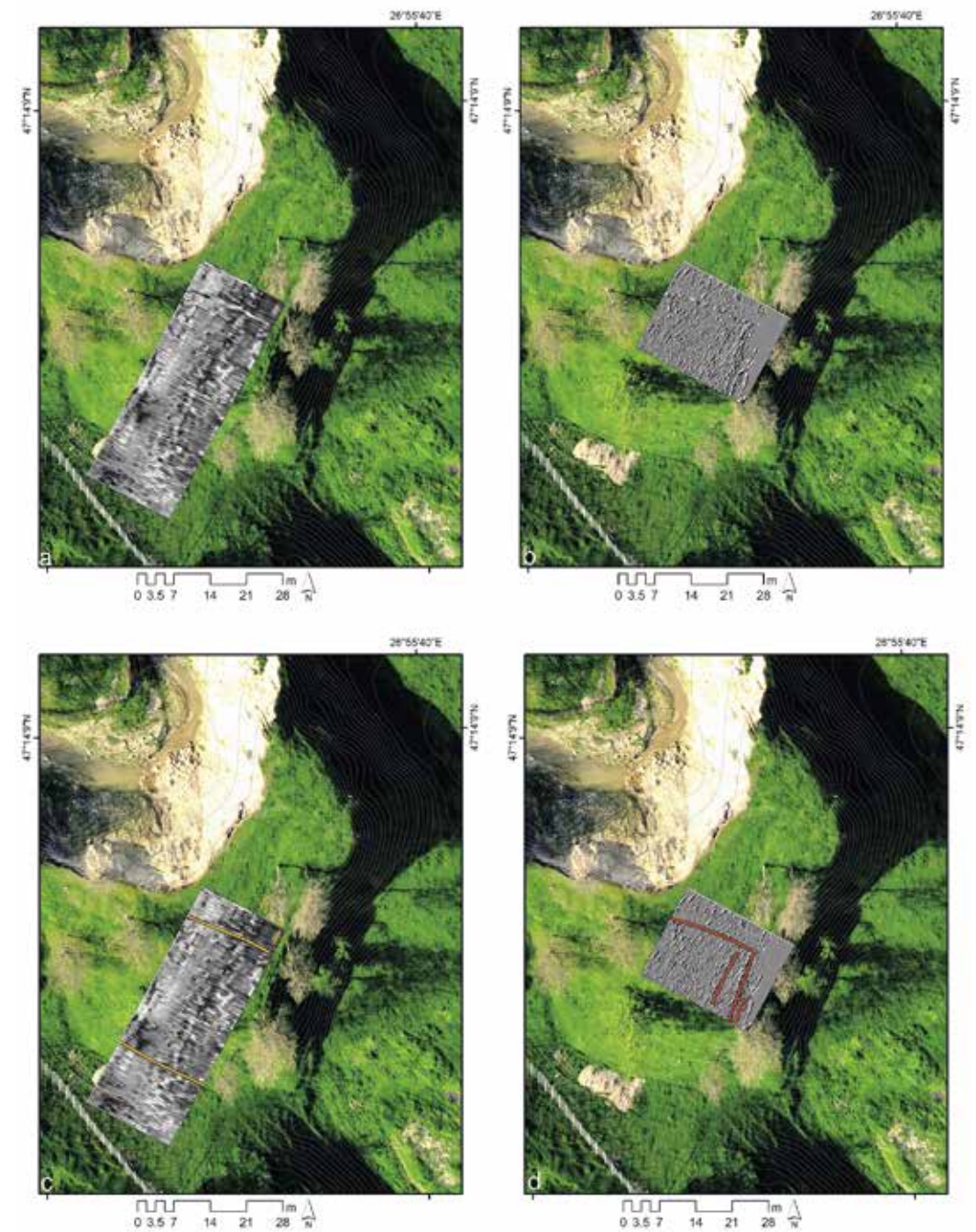


Fig. 10.
GPR interpretation

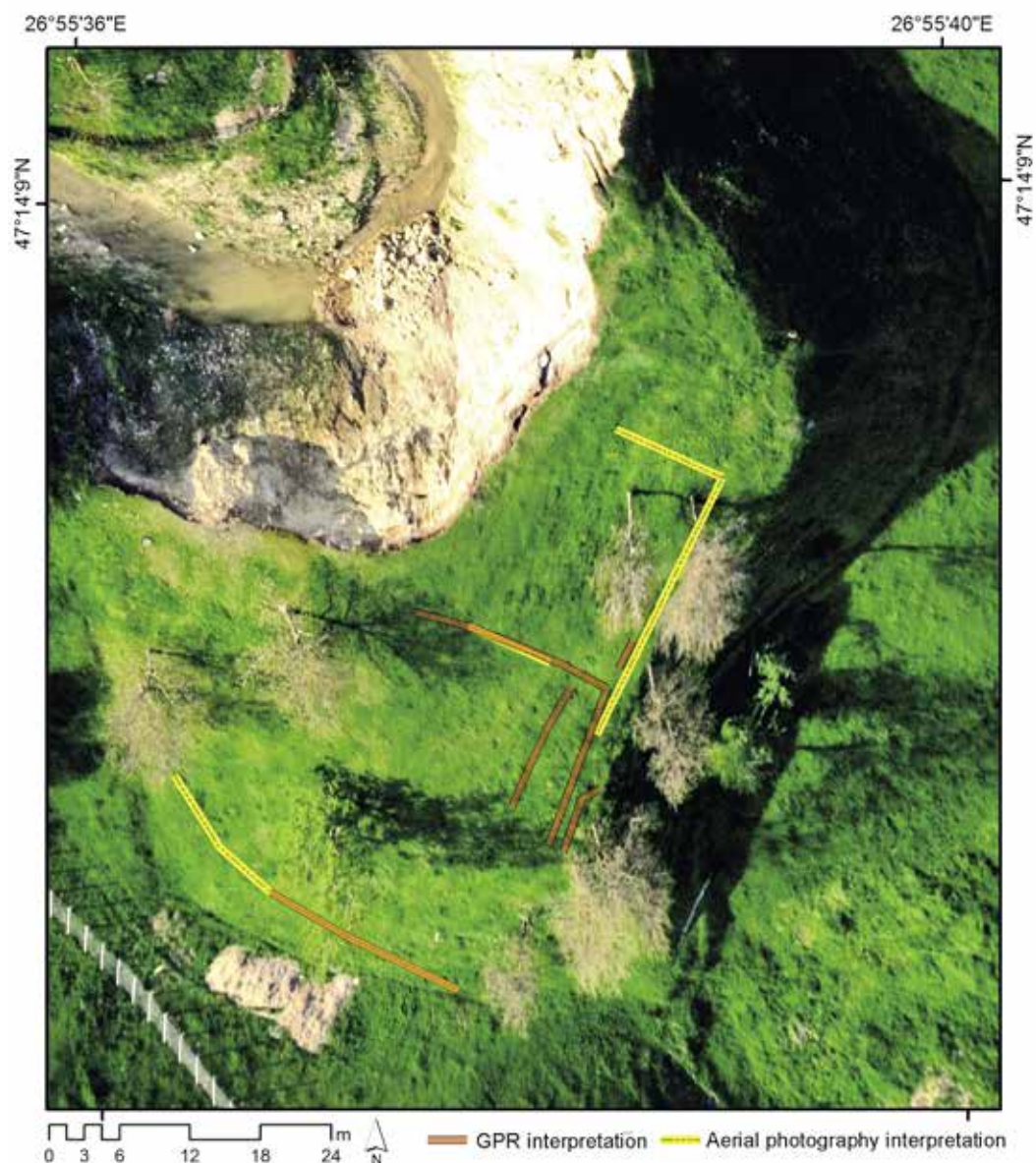


Figure 11.
Combined GPR and aerial photography interpretation.
Conclusions and future research directions

4. 4. Interpretation of aerial photographs

The analysis of over 30 aerial photographs for the area in question revealed several aspects that can support, beyond doubt, our initiative of elaborating an ampler characterization of the archaeological site of Costești.

Therefore, based on the overall images of the Bahluiet valley, captured downstream and upstream the site, we clearly distinguished the cornice of detachment and the (currently stabilized) landslide, which evolved during several phases; actually, the settlement is placed on its mound (fig. 2). It is also worth mentioning the windy path of the river, with numerous meanders, as well as its old streams which have altered considerably the configuration of the area. By analyzing the punctual, detailed images of the site, we noticed the presence of large positive or negative anomalies, possibly of archaeological nature. Among them, it is worth highlighting the semicircular defence ditch at the foot of the mound, on the southwestern side of the site (fig. 8). Furthermore, in the upper part of the site, we identified three linear anomalies, two of which make up a right angle. They may be caused by the presence of rock structures, probably vestiges of the old church attested here (after Boghian et al. 2013). This area also comprises several holes, which probably emerged – as previously stated – because of poachers or the inhabitants of the current village, who used to extract clay from this area. At the same time, these images are relevant enough for a solid argumentation on the extremely advanced state of degradation of the site.

4. 5. GPR (Ground-Penetrating Radar) measurements

Following the initial methodology for this study case, we continued with the complementary, integrated analysis of all the results, in our GIS project. The last non-destructive research method applied in this investigation was the geo-radar. Though the conditions of the site location are not ideal for this type of measurements, we believe that we obtained satisfactory results.

After analyzing both the vertical GPR profiles and the time slices, we pinpointed several types of anomalies, of various sizes. Among them, we distinguished several linear or arched anomalies, which we may consider as being of archaeological nature, by interpreting them alongside the other results. We have to mention that the area has been submitted to strong perturbations caused by tree roots or by rolled sandstones due to landslide, visible in the eroded part of the site.

However, we did manage to identify several linear structures, probably rock walls that may be connected to the ones noticed in the aerial photos and to the defence ditch which follows the same path as that of the aerophotograms (figs. 10, 11). We also made a GPR profile, 87 m long (the red line within Figure 9b), on an approximate north–south direction. For this profile, we made topographic corrections, which revealed several small-sized anomalies (unfortunately, they are very difficult to interpret), the geological structure with rolled sandstone, but also the aforementioned defence ditch.

5. Conclusions and future research directions

The non-invasive research of the Costești site and of the vicinity has not been finished. Though we obtained important and relevant information for the archaeological research concerning the fortification system of the site, its layout or the degree of degradation, as well as the landform configuration in this area, we can still study and treat many other aspects in an interdisciplinary manner. We refer here to the site erosion rate monitoring, which will continue, as well as to the need to apply the method of electrical resistivity

of soil, which could provide more data, necessary to our investigation. We also mention that we must complete our working methodology; it has proven efficient, but there is always room for improvement. Furthermore, by focusing on GIS spatial analyses applied on chronological levels, on an extended area around this point, as well as by correlating the intra-, extra-, and inter-site research, we will acquire the necessary data for an elaborated *landscape archaeology* study.

6. Acknowledgements

This work was supported by the Romanian National Research Council, through the program Partnership in Priority Domains, project PN-II-PT-PCCA-2013-4-2234, no. 314/2014, *Non-destructive Approaches to Complex Archaeological Sites. An Integrated Applied Research Model for Cultural Research Management* – arheoinvest.uaic.ro/research/prospect.

References

Asăndulesei et al. 2011

Asăndulesei A., Bem C., Venedict B., Bem C., Cotiugă V. Identity in diversity. Aerophotogrammetry, 3D laser scanning and magnetic prospecting on Gumelnița tells of Muntenia (Romania). 9th International Conference on Archaeological Prospection. Izmir, 2011. Pp. 25–28.

Asăndulesei et al. 2013

Asăndulesei A., Tencariu F.-A., Enea S.-C., Boghian D. Topographic surveys and geophysical investigations in prehistoric settlement from Tăcuta, Dealul Miclea. An integrated GIS based approach / in B.P. Niculică and D. Boghian (eds.). *Semper fidelis: in honorem magistri Mircea Ignat*. Brăila, 2013. Pp. 65–78.

Bem et al. 2013

Bem C., Asăndulesei A., Haită C., Bem C., Florea M. Interdisciplinary investigations. The tell settlement from Vătași Măgura (Teleorman County, Romania). *Studii de Presitorie* 10. București, 2013. Pp. 89–117.

Boghian et al. 2013

Boghian D., Enea S. C., Părpăuță T., Tencariu F.-A., Vornicu D.-M., Asăndulesei A., Gania S., Vornicu A., Furnică R.-G., Munteanu B. *Costești, com. Costești, jud. Iași*. Punct: Cier/Lângă Școală. *Cronica cercetărilor arheologice din Romania, Campania 2012*. Iași, 2013. Pp. 199–200.

Ciurea 1938

Ciurea V. Contribuții la preistoria județului Baia. Stațiunea de la Costești. Fălticeni, 1938.

Conyers, Goodman 1997

Conyers L. B., Goodman D. *Ground-Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*. Walnut Creek, 1997.

Gaffney, Gater 2003

Gaffney C., Gater J. *Revealing the Buried Past: Geophysics for Archaeologists*. Gloucestershire, 2003.

Leckebusch 2003

Leckebusch J. Ground-penetrating radar: A modern three-dimensional prospection method. *Archaeological Prospection* 10. 2003. Pp. 213–240.

Oberländer-Târnoveanu, Bem 2009

Oberländer-Târnoveanu I., Bem C. România: un viitor pentru trecut. Fotografii aeriene în repertoriul arheologic Arheologie aeriană în România și în Europa / in R. Palmer, I. Oberländer-Târnoveanu, C. Bem (eds.). București, 2009. Pp. 62–88.

Palmer 2009

Palmer R. Implicații ale arheologiei aeriene pentru arheologia din România // Arheologie aeriană în România și în Europa / in R. Palmer, I. Oberländer-Târnoveanu, C. Bem (eds.). București, 2009. Pp. 8–61.

RAJI II 1985

Chirica V., Tanasachi M. Repertoriul arheologic al județului Iași. Iași, 1984.

Romanescu et al. 2012a

Romanescu Gh., Cotiugă V., Asăndulesei A., Stoleriu C. Use of the 3D scanner in mapping and monitoring the dynamic degradation of soils. Case study of the Cucuteni-Băiceni Gully on the Moldavian Plateau (Romania) // *Hydrology and Earth System Sciences* 16(3). 2012. Pp. 953–966.

Romanescu et al. 2012b

Romanescu Gh., Cotiugă V., Asăndulesei A. Use of terrestrial 3D laser scanner in cartographing and monitoring relief dynamics and habitation space from various historical periods / in C. Bateira (ed.). *“Cartography” – A Tool for Spatial Analysis*. Croatia, 2012. Pp. 49–74.

Scollar et al. 1990

Scollar I., Tabbagh A., Hesse A., Herzog I. *Archaeological Prospecting and Remote Sensing*. Cambridge, 1990.

Д. Г. Бугров, И. И. Гайнуллин, А. В. Касимов, А. Г. Ситдинов
Институт археологии им. А. Х. Халикова Академии наук Республики Татарстан, Россия

А. В. Старовойтов, Б. М. Усманов, И. Ю. Чернова
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ПРИ СБОРЕ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ОСТРОВА-ГРАДА СВИЯЖСК

С 2011 года в рамках реализации программы по возрождению и развитию Болгарского историко-архитектурного музея-заповедника, Государственного историко-архитектурного и художественного музея «Остров-град Свияжск», иных памятников истории и культуры, расположенных на территории Республики Татарстан, ведутся широкомасштабные работы, включающие реставрацию и реконструкцию исторических достопримечательностей и строительство новых центров культуры и инфраструктуры. Одним из ключевых объектов является Остров-град Свияжск.

Уникальный объект историко-культурного наследия – Свияжск ($55^{\circ}47'$ с. ш., $48^{\circ}40'$ в. д.), ныне село в Зеленодольском районе Республики Татарстан, расположен при впадении реки Свияги в Волгу на вершине горы Круглой. После создания Куйбышевского водохранилища в 1955–1957 годах Свияжск оказался на острове овальной формы (около 900 метров в поперечнике), вытянутом с юго-запада на северо-восток (рис. 1).

Свияжск основан в 1551 году как форпост войск Ивана IV Грозного. Со второй половины XVI века до 1926 года Свияжск был уездным монастырским городом, затем селом. До наших дней на острове сохранилось шесть из одиннадцати церквей.

В 1962 году 21 здание на территории Свияжска поставлено под государственную охрану как памятники федерального значения. В 2009 году Свияжск отнесён к объектам культурного наследия республиканского значения в виде достопримечательного места (в границах Свияжского сельского поселения).

Одной из задач проекта является создание виртуального города Свияжска, с отображением всех представленных в историческом поселении ансамблей, памятников и археологических раскопов, с последующим созданием web-ресурса.

Комплекс мероприятий по визуализации историко-культурного наследия Свияжска можно разделить на несколько этапов.

Первый этап включает создание общей ГИС и обработку архивных данных, отчётов о проведённых археологических раскопках на территории Свияжска. Авторами осуществляется обработка материалов отчётов об исследованиях 2010–2012 годов в программе ArcGIS с геопривязкой пространственных данных – местонахождение раскопа, сооружения, выявленные в ходе работ, находки и пр. При этом для каждого раскопа создаётся соответствующая база геоданных (Старовойтов, Лунёва 2012. С. 88). Каждый элемент раскопа представляет собой класс пространственных объектов, которые представляют:

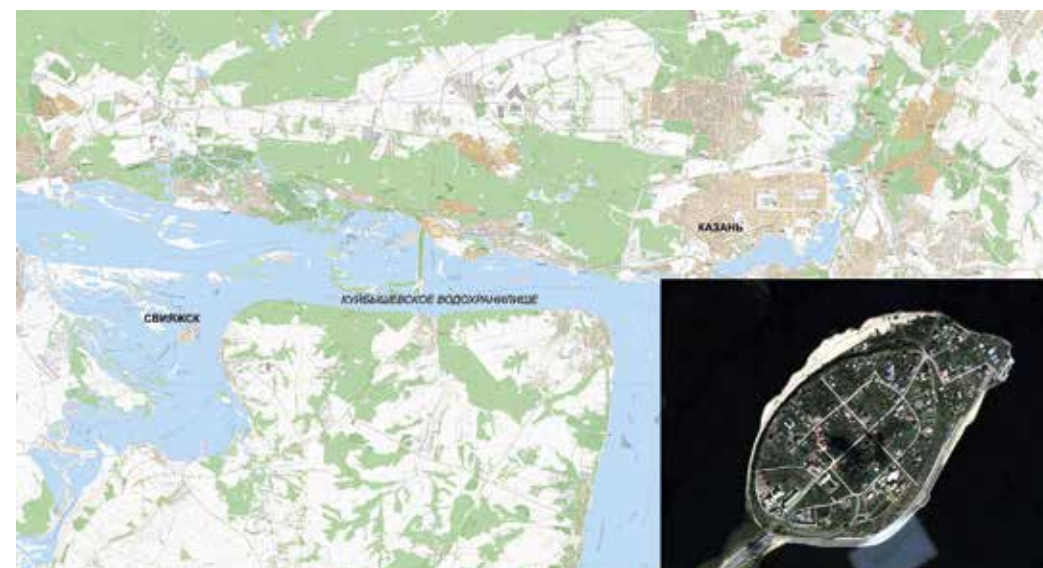


Рис. 1.
Карта местоположения с. Свияжска и космоснимок поселения

- ситуационный план (полигоны), характеризующий положение раскопа на местности, его форму и включающий основные данные о порядке раскопа, времени заложения, отработки и автора исследований и т. д.;
- общий план на уровне материкового слоя (полигоны), предоставляющий информацию о форме, номере вскрытого культурного слоя, глубине залегания, составе, включениях;
- находки (точки), показывающие место обнаружения, фотографию находки, её описание (рис. 2).

Источником информации о местоположении раскопов служат схемы расположения раскопов на территории Свияжска. Схемы и описания не определяют точное положение раскопов, но дают информацию о местонахождении раскопов в первом приближении. Данные о местонахождении отдельных находок также определяются по картопланам и описям находок. План раскопа – это прямоугольная сетка, которую легко сгенерировать, используя инструмент CreateFishnet, так как в археологических отчётах обычно приводятся данные об ориентации раскопа по сторонам света и о размерах сетки планов.

На втором этапе, в 2013–2014 годах, проведены работы по съёмке археологических раскопов методом фотограмметрии. В археологических исследованиях методы фотограмметрической съёмки используются сравнительно недавно, тем не менее они получили широкое распространение в России (Сингатулин 2013. С. 148). Результатами фотограмметрического обмера являются ортофотоплан, цифровая модель рельефа, трёхмерная геометрия с текстурой поверхности.

В ходе съёмки применялись три основных метода фиксации археологических объектов, разработанных в Институте геологии Казанского университета (Чернова и др. 2012. С. 5):

1. Метод центральной оси;
2. Метод перспективной маршрутной съёмки;
3. Метод фиксации углов.

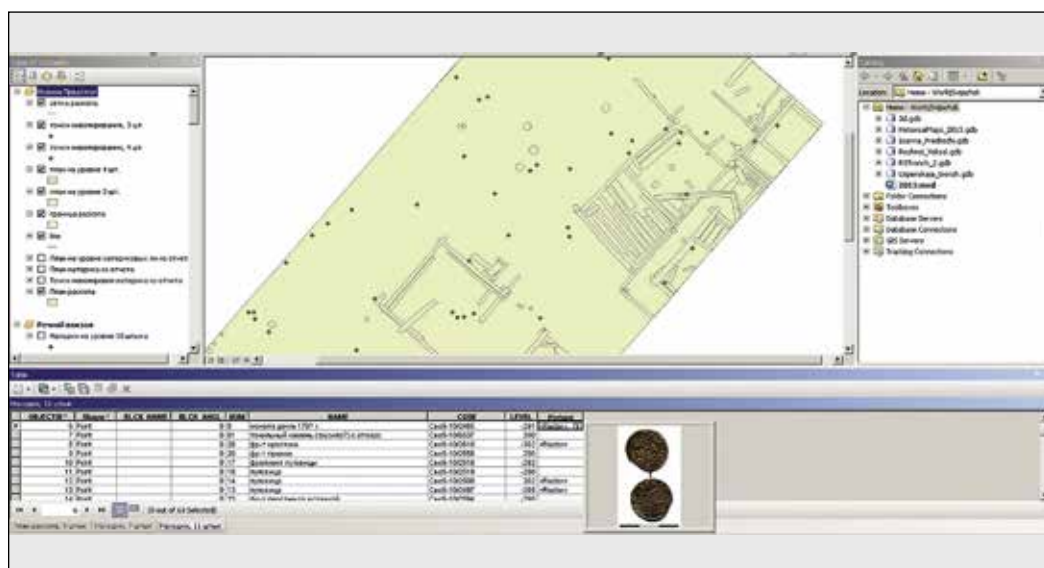


Рис. 2.
План раскопа с сооружениями и находками. Отображение данных

По ходу съёмки все три метода использовались как по отдельности, так и в комбинации. Наилучшие результаты при съёмке больших по площади раскопов показал метод перспективной маршрутной съёмки. Отдельные объекты раскопа, в частности сооружения, фиксировались методом центральной оси. В случае небольших по площади раскопов или съёмки отдельных секторов, с определением положения только угловых узлов сетки, оптимально использование метода фиксации углов.

По результатам фотограмметрии были получены модели раскопов 2013–2014 годов, представленные в виде ортофото- и obj-файлов (рис. 3–5).

При создании 3D-моделей методом фотограмметрии также применялась низко-высотная аэрофотосъёмка объектов истории и культуры, а также археологических раскопов беспилотным летательным аппаратом вертолётного типа (рис. 6). Преимущество данного вида съёмки заключается в том, что аппарат аэрофотосъёмки с высоты 100–200 м может облететь большую территорию и снять даже такие большие по площади и высоте объекты, как Собор Всех Скорбящих Радости, чего нельзя добиться с помощью наземных методов – фотограмметрии и лазерного сканирования.

Третий этап в создании виртуальной модели Свяжска заключается в съёмке зданий и сооружений наземным лазерным сканером Trimble GX™ для последующей обработки и создания 3D-моделей зданий и панорамных изображений.

При помощи лазерного сканера можно в кратчайшие сроки определить объёмы объектов неправильной формы, а также геометрические параметры зданий и сооружений и выдать результат в виде полученного при измерениях «облака точек», 3D-модели или 2D-топоплана в зависимости от поставленной задачи.

Следует отметить, что трёхмерное проектирование стало современным стандартом, предъявляющим новые требования к исходной документации. Основными преимуществами данной технологии являются актуальность документации, трёхмерный вид и получение результата в сжатые сроки. Авторами была разработана методика по съёмке зданий и сооружений с использованием технологии наземного лазерного сканирования, включающая в себя следующие этапы:



Рис. 3.
Ортофотография раскопа на территории Успенского богородицкого монастыря на промежуточном этапе

Рис. 4.
3D-модель раскопа после выхода на уровень материка

Рис. 5.
3D-модель бывшей Никольской церкви после проведения раскопок



Рис. 6.
Построение и регулярное обновление 3D-модели на основе данных аэрофотосъёмки

1. Составление технического проекта.
2. Рекогносцировка местности.
3. Подготовка планово-высотного обоснования сканерной съёмки.
4. Трёхмерное наземное лазерное сканирование.
5. Камеральные работы.
6. Оформление и сдача продукции.

Технология съёмки с применением лазерного сканера зависит от геометрии и типа снимаемого объекта (Yermolaev et al. 2013. С. 1106). Для достижения результата иногда приходится многократно переставлять сканер с точки на точку, выполняя съёмку отдельных деталей и фрагментов. Причина заключается в наличии мёртвых зон, возникающих в силу различных обстоятельств. Поэтому нередко возникает необходимость привести отснятый материал к единой системе координат. Для этого во время съёмки на объекте или рядом с ним устанавливаются марки, с помощью которых производится объединение облаков точек, полученных с различных точек сканирования. Для пространственной трансформации облаков требуется, как минимум, три марки на каждую точку установки сканера. Эти три точки с марками должны быть видны со смежных точек. Точность лазерного сканирования в единой системе координат обеспечивается обоснованием координат марок путём проложения тахеометрического хода от геодезического репера. В результате погрешность съёмки составляет 2 мм. Сам процесс объединения облаков точек выполняется в специализированном программном обеспечении.

После предварительной обработки результатов сканирования данные обрабатываются с использованием программы Trimble™ RealWorks для получения 3D-моделей и создания планов зданий.

В результате проведённых обследований были получены материалы, включающие результаты съёмки объектов на участке набережной р. Щуки, ул. Московская и ул. Константиновская, Успенского собора и Никольской церкви на территории Успенского Богородицкого монастыря (рис. 7–8).

На заключительном этапе при подготовке виртуальной модели Свияжска происходит обработка исторических карт города конца XVIII – начала XIX века, а также карты Сви-



Рис. 7.
Результаты сканирования объектов на территории Успенского Богородицкого монастыря. Вариант с текстурами

Рис. 8.
Результаты сканирования церкви Константина и Елены. Вариант с текстурами

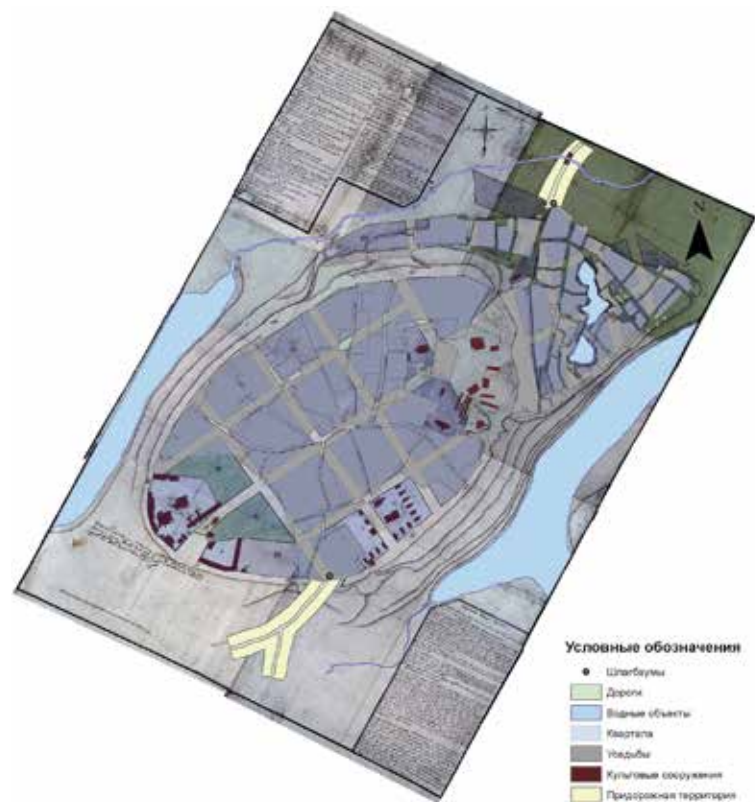


Рис. 9.
Карта г. Свияжска, начало XIX века

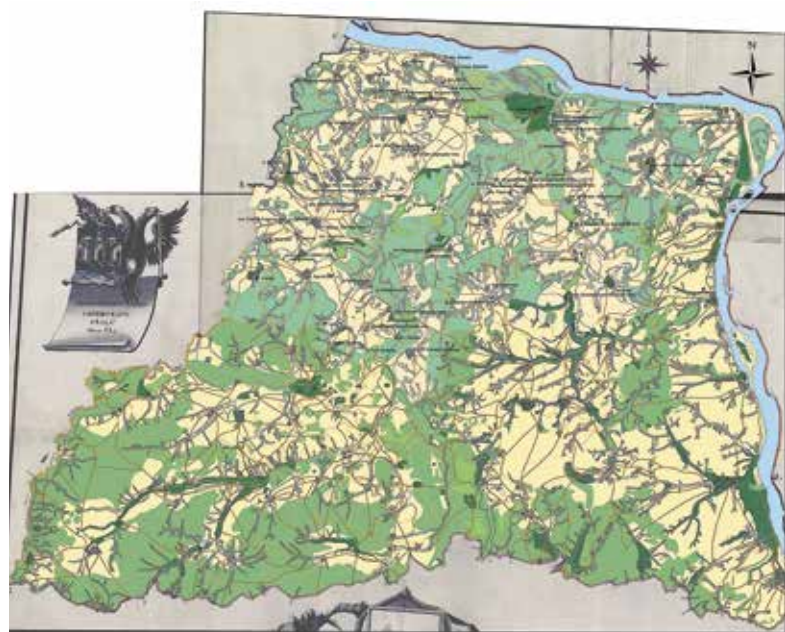


Рис. 10.
Карта Свияжского уезда конца XVIII века

яжского уезда. Этот этап особенно актуален при визуализации историко-культурного наследия Свияжска в том числе по причине радикального изменения ландшафта после разлива Куйбышевского водохранилища. Карты, хранящиеся в различных российских архивах, сканируются, затем растровые изображения привязываются к единой координатной системе, и каждый элемент карты векторизуется в программе ArcGIS с созданием соответствующих слоёв и элементов базы геоданных. В результате определяется местоположение разрушенных или затопленных объектов, населённых пунктов и пр.

К примеру, база геоданных *HistoricalMaps2013*, содержащая данные карты Свияжского уезда конца XVIII века, содержит 16 элементов: 2 растровых набора данных и 14 классов пространственных объектов, которые представляют собой 2 исторические карты, относящиеся предположительно к концу XVIII – началу XIX века (рис. 9–10).

Применение различных методов фотограмметрии и лазерного сканирования, организация геопространственных данных в ГИС и 3D-графики при создании виртуального образа Свияжска – это возможность использовать реконструкции для публикации различных материалов по истории, археологии и иных объектах культурного наследия, введение их в научный оборот.

При применении комплексного подхода при визуализации историко-культурного наследия возможно создание качественной виртуальной модели Свияжска. При использовании различных техник – фотограмметрии и лазерного сканирования – съёмка раскопов и объектов архитектуры значительно упрощается и ускоряется, а качество её повышается.

Презентация данных – основная проблема при визуализации наследия, решить её можно созданием web-ресурса. Таким образом, сведения о Свияжске, данные в геоинформационной системе и 3D-модели объектов архитектуры и археологии могут быть представлены различным группам пользователей с соответствующим уровнем доступа.

Литература

Сингатулин 2013

Сингатулин Р. А. Фотограмметрические технологии в археологии (краткий исторический очерк) // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики: в 2-х ч. Тамбов, 2013. № 3 (29). Ч. I. С. 148–152.

Старовойтов 2012

Старовойтов А. В., Лунёва О. В. Проблематика создания геоинформационного проекта для ведения археологических исследований // Сборник научных трудов Sworld: материалы международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2012» (Одесса, 20–31 марта 2012 г.) / ред. С. В. Куприенко. Одесса, 2012. Вып. 1. Т. 23. С. 87–90.

Чернова и др. 2012

Чернова И. Ю., Старовойтов А. В., Лунёва О. В. Создание историко-культурной геоинформационной системы Болгарского городища // ArcReview. Современные геоинформационные системы. М. : ООО ДАТА+, 2012. № 3 (62). С. 5–6.

Yermolaev et al. 2013

Yermolaev O. P., Usmanov B. M. Terrestrial laser scanning methods as instrument of landslide and erosion processes study // Scientific Committee of the 8th IAG International Conference on Geomorphology, «Geomorphology and Sustainability». Paris, 2013. Abs. Nr 1086. P. 1106.

П. Е. Сорокин

ИИМК РАН, Россия

Т. М. Гусенцова

АНО "НИИ культурного и природного наследия", Россия

А. Ю. Сергеев, Д. В. Рябчук

ВСЕГЕИ им. А. П. Карпинского, Россия

М. А. Кулькова

РГПУ им. А. И. Герцена, Россия

ПАЛЕОЛАНДШАФТ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ЛИТОРИНОВОГО МОРЯ В РАЙОНЕ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО ПАМЯТНИКА ОХТА 1

В результате археологических исследований, проводившихся в устье р. Охты в Санкт-Петербурге, были получены не только новые данные об освоении этой территории древними людьми, но и необходимые сведения для реконструкции палеоландшафта береговой линии Литоринового моря в регионе Петербурга в конце 5-го – 2-го тыс. до н. э. / 7-е – 4-е тыс. cal BP). Поселение Охта 1 по своим масштабам и сохранности остатков деревянных конструкций входит в число редчайших объектов на территории Северо-Восточной Европы. Анализ геолого-геоморфологических и археологических материалов показывает, что в период максимальной фазы литориновой трансгрессии (7700–7300 cal BP) на значительной части площади современного Санкт-Петербурга существовал открытый залив. На следующем этапе палеогеографического развития (6500–5500 cal BP) в условиях постепенного понижения относительного уровня моря здесь сформировалась лагуна, отделённая от открытой части Литоринового моря так называемой Лиговской косой. Лагуна была связана с Литориновым морем проливом, располагавшимся в пределах современного русла р. Невы (Сергеев и др. 2013), приуроченного к палеодолине (Ауслендер и др. 2002).

Первые палеогеографические карты распространения послеледниковых водоёмов, включая Литориновое море, были подготовлены уже в 1920–1930 годах (Яковлев 1925; Марков 1931). В 1960–1970 годах были проведены геологическая съёмка и первое абсолютное датирование четвертичных отложений региона. В 1980–2000 годах специалисты Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ) в рамках геологической съёмки шельфа исследовали распространение, состав, структуру и мощность четвертичных отложений восточной части Финского залива (Знаменская, Черемисинова 1974; Спиридонов 1989; Малаховский 1995 и др.). Несмотря на то что к настоящему времени накоплены обширные данные по истории геологического развития восточной части Финского залива в голоцене, целый ряд вопросов остаётся дискуссионным. В частности, отсут-

ствуют непротиворечивые региональные схемы относительного изменения уровня моря в среднем и позднем голоцене. Во многом поэтому существует скептическое отношение к возможности существования неолитических поселений в устье Невы.

Новые перспективы в решении дискуссионных вопросов палеогеографического развития региона открываются благодаря междисциплинарным научным исследованиям в области археологии и геологии. Уже с начала XX века изучение археологических памятников каменного века на побережьях Финского залива проводилось совместно известными археологами и геологами, среди которых были, в частности, Б. Ф. Земляков, С. А. Яковлев, И. И. Краснов, Г. П. Сосновский, М. Я. Рудинский, Л. А. Динцес. В ходе археологических исследований побережий Финского залива последних лет было установлено, что в литориновое время (8500–4500 cal BP) в юго-восточной части Финского залива наиболее благоприятными зонами промысловой деятельности людей были лагунные системы в междуречье Нарвы и Луги, в районе Сестрорецка и Лахты (Герасимов 2006; Герасимов и др. 2010; Rosentau et al. 2013).

Наиболее сложной с точки зрения палеогеографических реконструкций в восточной части Финского залива является территория Санкт-Петербурга, некогда бывшая восточной береговой зоной Литоринового моря. Геолого-геоморфологические исследования здесь осложняются из-за полного изменения поверхностного рельефа и верхней части геологических слоёв в условиях развития мегаполиса. Поэтому большое значение для палеогеографических реконструкций имеют археологические объекты эпохи камня – раннего металла. Первый памятник эпох неолита – раннего металла в бассейне реки Невы – Охта 1 – был исследован в центре Санкт-Петербурга на Охтинском мысу в 2008–2010 годах. Всего на территории около 5 га были изучены участки общей площадью 8140 кв. м. При этом культурные слои, содержащие остатки стоянок эпохи неолита и раннего металла и следы промысловой деятельности, были выявлены на всей территории мыса при впадении р. Охты в р. Неву на отметках около 0,5–2,5 м от уровня Балтики (рис. 1.1). В ходе раскопок было выделено два культурных слоя: слой эпохи неолита (конец 5-го – 4-е тыс. до н. э. / 7–6 тыс. cal BP) и слой раннего металла (конец 4-го – 2-е тыс. до н. э. / 6 – 4 тыс. cal BP) мощностью 1,9–2,5 м. Стратиграфия культурных напластований, многочисленные объекты с остатками деревянных конструкций, состав находок указывают на неоднократное заселение территории памятника. Появление первых людей на этой территории могло произойти только после отступления Литоринового моря.

От средневековых слоёв слои неолита и раннего металла были отделены песчаными отложениями мощностью до 1 м, которые связываются с морскими трансгрессиями и с образованием р. Невы около 3100 BP в результате прорыва вод из Ладожского озера в Финский залив. Археологические данные опровергают теорию о том, что первоначально между Ладогой и заливом существовала очень широкая протока, и этот пролив сохранялся до самой эпохи Средневековья. Почвенный слой, образовавшийся на песчаных наносах, связанных с прорывом Невы, изучался на Охтинском мысу на отметках около 2,5 м и датируется временем близким к 2800 cal BP. И в это же время сюда возвращается население. Таким образом, удалось установить, что вскоре после образования Невы ее воды вошли в современное русло (Kulkova et al. 2014).

Коллекция археологических находок насчитывает свыше 12 тысяч изделий из керамики, камня, органики и янтаря. Керамический комплекс включает ямочно-гребенчатую, пористую и асбестовую керамику, куда входят развалы сосудов, которые можно реконструировать. Коллекция изделий из камня представлена орудиями из кремня, кварца, сланца, песчаника. Найдены десятки кремнёвых наконечников стрел,

сланцевые стамески, долота, тёсла, каменные топоры и грузила. Изделия из бересты, коры и дерева представлены оплетками грузил, берестяными коробами (12 экз.), скоплениями обработанных реек-лучин, кольями (более 400 экз.) (Гусенцова, Сорокин 2011; Гусенцова, Сорокин 2012, Kulkova et al. 2014). Все эти находки свидетельствуют об оседлости и интенсивной хозяйственной деятельности древних людей на морском побережье в течение продолжительного времени. В центральной части мыса выявлены следы пребывания здесь человека в эпоху бронзы, а также в период раннего железного века – остатки кострищ и артефакты (800 г. до н. э. – 500 г. н. э. / 2750–2450 cal BP).

Благодаря тому, что раскопки проводились на значительных площадях, удалось проследить микрорельеф на территории памятника. Особенности микрорельефа, расположение археологических объектов и находок, а также большой массив радиоуглеродных дат (более 150) позволяют выделить прибрежную промысловую зону, расположенную на берегу моря, и промысловую и жилую зоны, связанные с речными протоками. Комплексные исследования культурных и геологических отложений на памятнике включали литологический, минералого-геохимический, спорово-пыльцевой, диатомовый, радиоуглеродный и дендрохронологический анализы (Гусенцова, Сорокин 2011; Кулькова и др. 2010).

На основе этих исследований была сделана реконструкция палеорельефа исследованной площади по уровню кровли слоя серых алевроитов с прослоями ожелезненного песка, связанного с нижней пачкой слоев (рис. 1.2). Накопление этих отложений, прослеживаемых на большей части исследованной территории, происходило в условиях стационарного отложения взвешенного материала. К этим слоям приурочены остатки деревянных конструкций, связанные с промысловой деятельностью человека, обломки вбитых кольев и рейки, находки глиняной посуды преимущественно эпохи среднего и позднего неолита. Большинство деревянных конструкций располагалось в локальных понижениях рельефа (ямах, западинах) округлой, овальной или удлиненной формы глубиной от 0,2 до 1,0 м и площадью от 4 до 65 кв. м в северо-западной части исследованной площади. Важно отметить, однако, что в некоторых случаях колья, обнаруженные в слоях нижней группы слоев, были забиты сквозь вышележащий слой крупнозернистого песка, разделявшего нижний и верхний культурные слои. Верхний уровень, с которого были вбиты колья, составляет 2,00–1,90 БС (рис. 2).

По абсолютным отметкам, полученным в ходе раскопок, была восстановлена палеоповерхность кровли нижней пачки. Реконструкция палеоповерхности рельефа производилась в программе трёхмерного моделирования 3DMax 9.0 на основе детальных литологических разрезов и нивелировочных отметок (Сергеев и др. 2013) (рис. 2.2). Морфологически поверхность характеризуется чётким поднятием в центральной и южной части. В центре мыса ее уровень достигает абсолютных отметок в 2,50 БС, резко понижаясь до 1,00 БС на восток к руслу р. Охты и полого опускаясь в северо-западном направлении в сторону современного русла р. Невы до высоты 0,50 БС. В плане поверхность напоминает субмеридиональный вал, плавно погружающийся в северном направлении.

В северо-западной части реконструированной палеоповерхности (у современного русла р. Невы) выделяется выдержанный прослой хорошо сортированных песков волнового генезиса, отсутствующий на других разрезах мыса. В плане данный прослой образует вытянутое в субмеридиональном направлении песчаное тело длиной около 20 м и шириной до 5 м, севернее которого палеоповерхность продолжает понижаться. Данное геологическое образование, вероятно, маркирует береговую



Рис. 1.
Археологический памятник Охта 1: 1 – деревянные сооружения,
2 – археологические находки

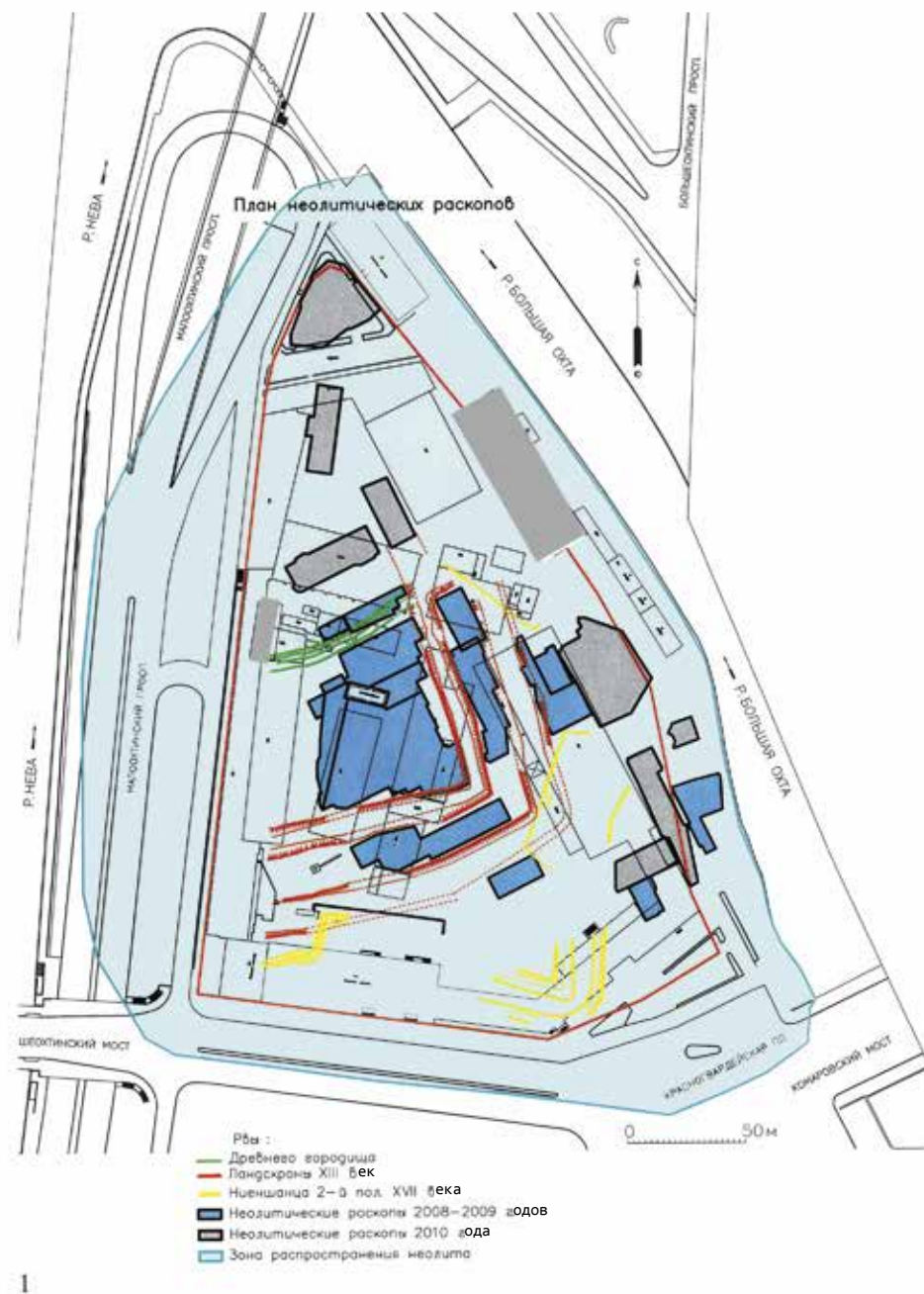


Рис. 2.
Археологический памятник Охта 1: 1. Расположение раскопов (2008–2010 гг.)
и неолитического культурного слоя на Охтинском мысу

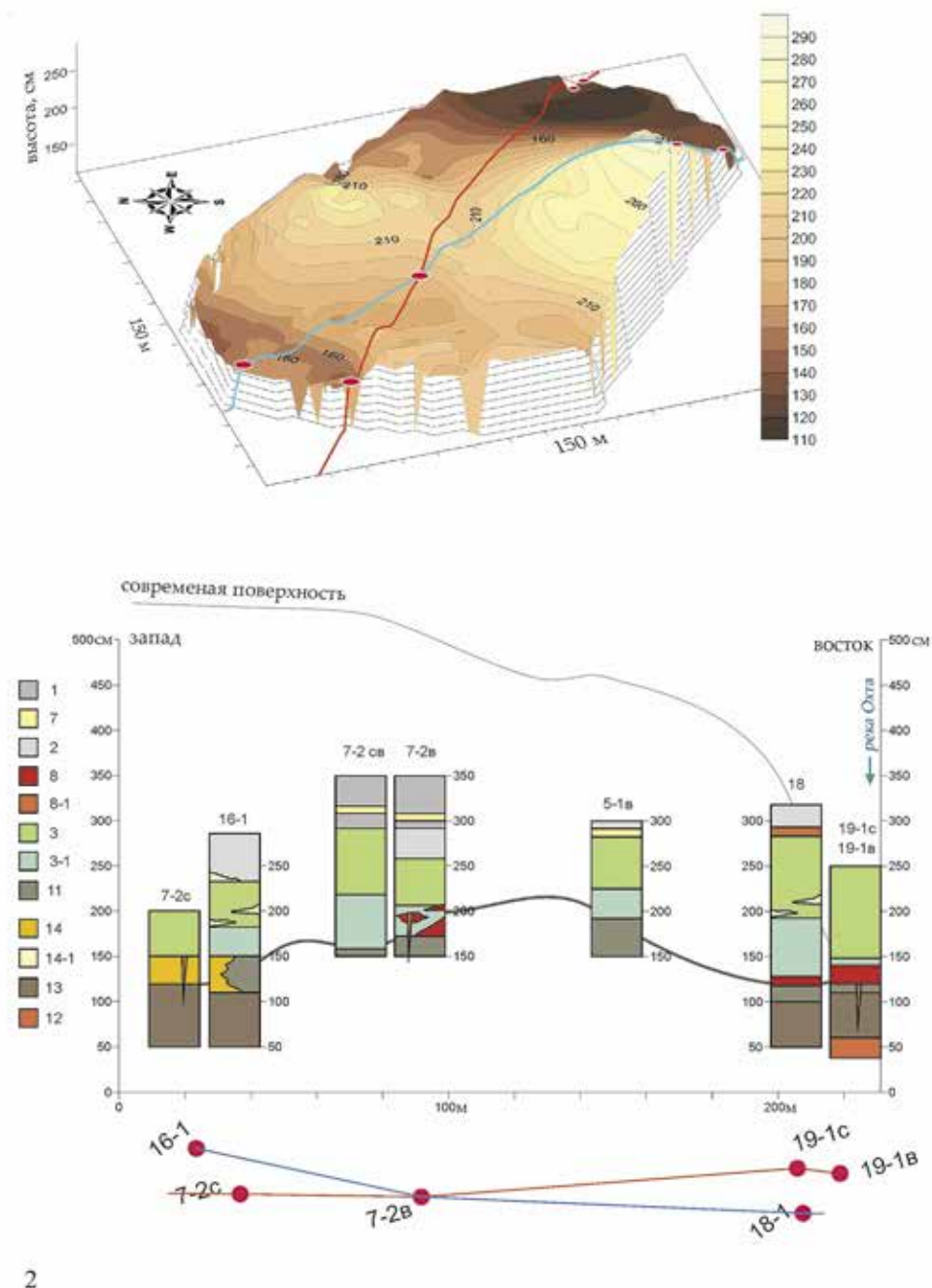


Рис. 2.
Археологический памятник Охта 1: 2.2. Трехмерная диаграмма поверхности
нижней пачки слоев и расположение колонок на гипсометрическом профиле.

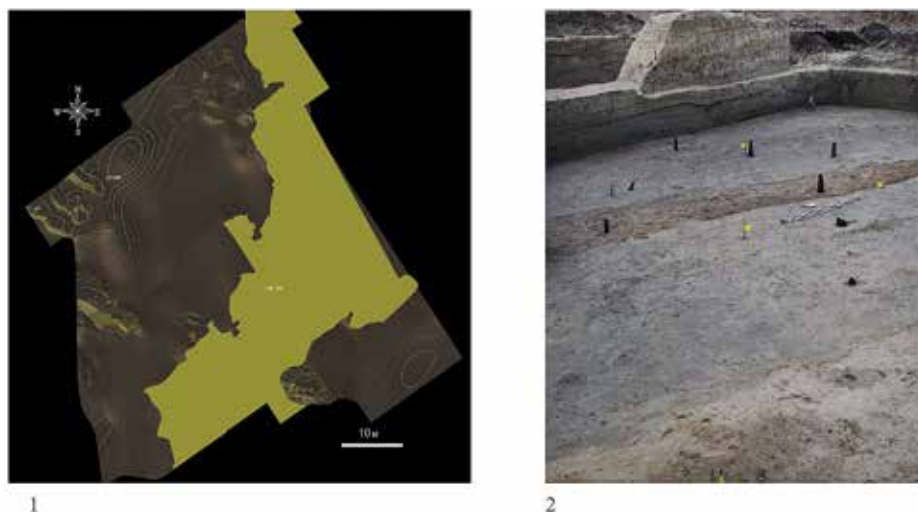


Рис. 3.
Протока неолитического времени:
1 – реконструкция палеопротоки, 2 – Протока с рядами колов

линию палеолагуны, представляя собой аккумулятивное тело — локальную косу или бар морского (лагунного) происхождения, либо устьевой речной бар палеоОхты.

Между описанным песчаным образованием и центральным поднятием реконструкция выявила вытянутое в субмеридиональном направлении локальное понижение рельефа («палеопротоку») шириной до 12–14 м, с которой связана находка части кольев (рис. 3). Конструкции в протоке существовали достаточно долго, находки из ее заполнения относятся к эпохам позднего неолита и раннего металла. На дне «протоки» были обнаружены скопления древесных остатков: стволов деревьев до 6 м (ель и лиственничное с сучьями), а также ветви, шишки ели, орехи лещины.

В дно западин, расположенных к югу от протоки, и рядом с ними были вбиты колья, здесь же находились упавшие колья, скопления обработанных реек и фрагменты деревянных предметов. Всего было найдено около 400 кольев, изготовленных из сосны обыкновенной, ольхи, ели, ивы, берёзы, можжевельника и рябины. Диаметр кольев варьирует от 4,0 до 16 см, единичные колья достигают 18–22 см в диаметре. Длина сохранившихся фрагментов от 0,5 до 2,5 м. Полученные результаты дендрохронологического и радиоуглеродного анализа спилов кольев (40 дат) позволяют проследить некоторую последовательность устройства конструкций с колами в период 5550–4650 cal BP. Наиболее позднюю группу составляют колы в районе древней протоки: 5050–4650 cal BP. По данным радиоуглеродного анализа многочисленные остатки конструкций из реек были изготовлены в разное время. Наиболее древние из них, располагавшиеся в западной части мыса, относятся к эпохе неолита 6296–5562 cal BP. Другие конструкции, как и большинство кольев, относятся к эпохе раннего металла. Ямы в нижнем слое, выявленные в ходе раскопок, были расположены перпендикулярно простиранию косы и, соответственно, береговой линии.

Анализ литературных данных и материалов, полученных в ходе археологических раскопок на Охтинском мысу, показывает, что рассматриваемый район в период после максимальной фазы первой Литориновой трансгрессии представлял собой береговую зону лагуны, отделённой от открытой части Литоринового моря так

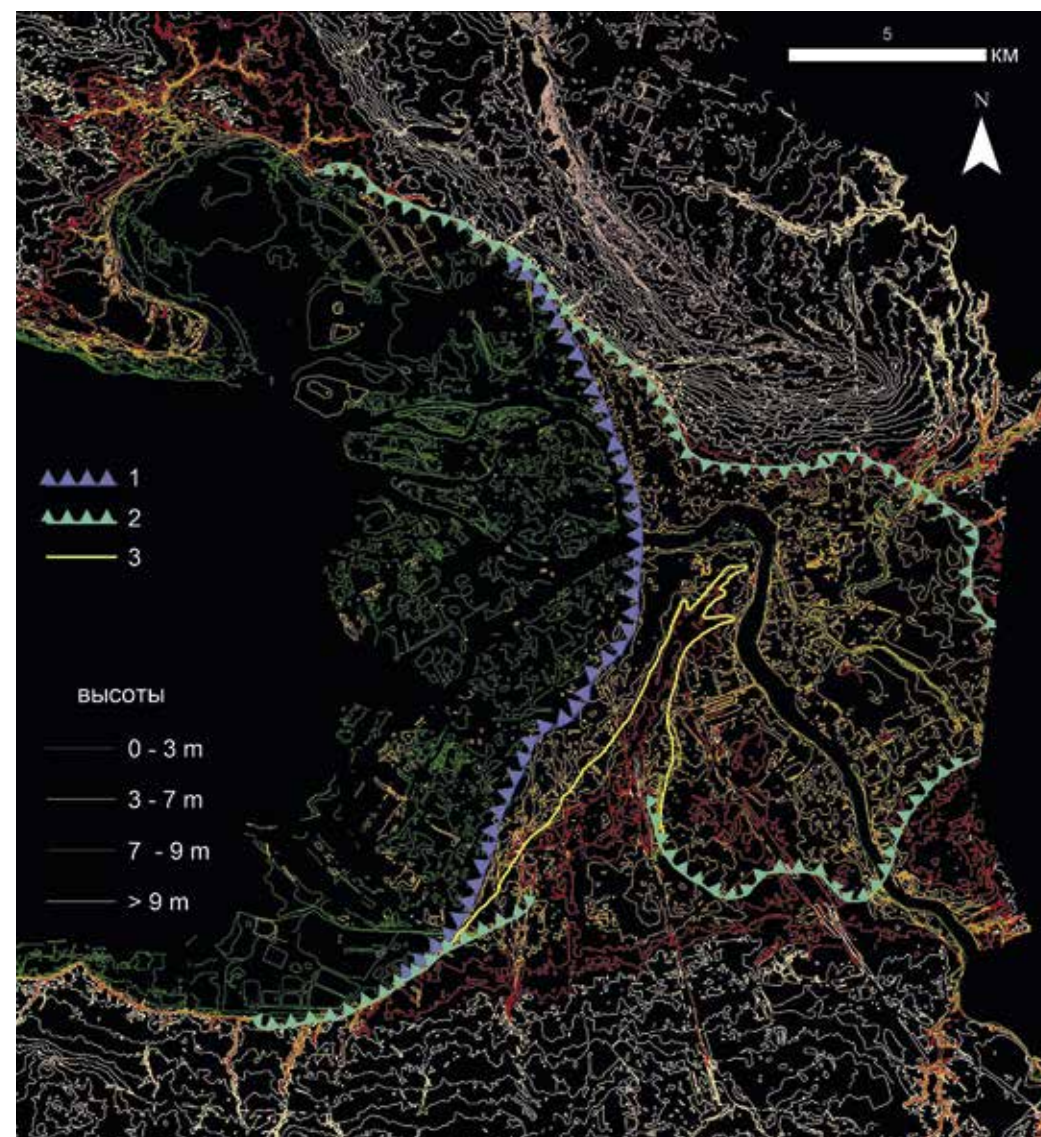


Рис. 4.
Границы распространения береговых форм террас Литоринового моря.
1 – граница «Василеостровской» террасы 0–3 м (Знаменская, Черемисинова 1974);
(граница Древнебалтийской трансгрессии по С. А. Яковлеву (1925));
2 – граница «Охтинской террасы», сформированной в ходе максимальной фазы
Литориновой трансгрессии;
3 – Лиговская коса (по изогипсе 6 м) с использованием схемы С. А. Яковлева (1925)

называемой Лиговской косой (Яковлев 1925) и имевшей постоянную связь с морем в районе современного русла р. Невы (рис. 4). Береговая линия Литоринового моря четко выражена в рельефе абразионными уступами и береговыми валами.

Региональная палеорекострукция рельефа для различных этапов развития литоринового и постлиторинового времени для района Санкт-Петербурга и восточной части Финского залива была выполнена в программе Surfer (Сергеев и др. 2013) с использованием базы данных о современном рельефе суши (Геологический атлас Санкт-Петербурга 2009), карты насыпных грунтов (Ленинград. Историко-географический атлас 1981), батиметрической карты восточной части Финского залива (Атлас геологических и эколого-геологических... 2010), а также топографической карты С. А. Яковлева (Яковлев 1925).

Восточная береговая линия Литоринового моря не так четко выражена в рельефе. Береговые формы максимальной фазы развития Литориновой трансгрессии прослеживаются здесь на расстоянии до 13 км от современной береговой линии (Лахтинская депрессия, Приневская низменность). В Санкт-Петербурге наблюдаются две литориновые террасы. Первая терраса «Василеостровская» располагается на абсолютных отметках 0–3 БС. Вторая, более высокая «Нижеохтинская» терраса, лежит на высоте 4–6 БС. Наивысший уровень максимальной литориновой трансгрессии в районе достигал современной отметки 6 БС (Знаменская, Черемисинова 1974) (рис. 4).

К наиболее крупным аккумулятивным формам Приневской низменности на территории Петербурга относятся Лиговская и Сестрорецкая песчаные косы. Лиговская коса, перекрытая насыпными грунтами и, тем не менее, выделяющаяся в рельефе, протягивается через центральную часть города в юго-западном направлении от ул. Восстания по Лиговскому пр. в сторону района Автово. Абсолютные отметки ее поверхности (под насыпным грунтом) достигают 7 м, тогда как уровень окружающей литориновой террасы здесь на 3–4 м ниже. Длина косы составляет около 10 км, ширина – от 600 м до 1,5 км. Общая мощность литориновых отложений в пределах Лиговской косы достигает 8,4–9,5 м. Образование самой косы, цоколем которой на всем ее протяжении является торфяник, датируется временем литориновой трансгрессии (Яковлев 1925).

По современным данным начало трансгрессии Литоринового моря датируется временем от 8600–8500 cal BP (Miettinen et al. 2007) до 8200 cal BP (Малаховский и др. 1989). Максимумы трансгрессии Литоринового моря по разрезам Карельского перешейка датируются периодами около 7700 и 6500 cal BP (Miettinen et al. 2007). На основе анализа данных по распределению диатомовой флоры в донных отложениях озер и восточной части Финского залива (Джиноридзе 1986) и геоархеологических исследований побережий Нарвского и Лужского заливов (Rosentau et al. 2010) в этот период выделяется единая трансгрессивная фаза. Морские отложения, вскрытые в основании разреза на р. Охте и интерпретируемые как осадки времени литориновой трансгрессии, также датируются временем 8460–7600 cal BP (Kulkova et al. 2014). Моделирование уровня Литоринового моря в ходе максимума трансгрессии, проведенное с учетом естественных скоростей осадконакопления в районе Охтинского мыса, а также мощности техногенных отложений на территории Санкт-Петербурга показывает, что в этот период место «Охтинского мыса» располагалось в центральной части открытого залива, где даже во время максимального уровня моря глубины, вероятно, не превышали 4–5 м.

Результаты междисциплинарных исследований показывают, что в ходе развития первых фаз литориновой трансгрессии (7700–6500 cal BP) на значительной части

современного центра Санкт-Петербурга сформировалась лагунная система, частично отделенная от открытой части моря песчаной Лиговской косой (длина 10 км, ширина до 1,5 км). Рост косы происходил в северо-восточном направлении от коренного берега моря в районе Лигово. Источником песчаного материала служил вдольбереговой поток наносов, образованный преимущественно за счет перемыва ледниковых и ледниково-водных отложений. Район современного устья р. Охты располагался в пределах северной части лагуны вблизи палеопролива. Подтверждением существования здесь лагуны являются вскрытые алевро-песчаные отложения, которые могли формироваться только в мелководной, отделенной от открытого моря акватории с пониженной волновой активностью. Таким образом, создались условия, благоприятные для первичного освоения этой территории неолитическим человеком, заселившим внутренние берега лагуны, на что указывают и обнаруженные при раскопах наиболее древние промысловые конструкции из реек (Ryabchuk et al. 2014).

От 6500 до 5500 cal BP, как следствие регрессивной фазы развития Литоринового моря, центральная и южная части исследованной площади (район современного устья р. Охты) были осушены с формированием в ее пределах небольших речных протоков, о чем свидетельствуют обнаруженные здесь локально русловые отложения. В юго-западной части площади располагался песчаный бар, отделенный от «материковой» суши субмеридиональной мелкой протокой, в которой была расположена часть деревянных конструкций. На пониженном прибрежном участке находилась «промысловая зона», на возвышенном – «жилая».

От 5200 до 4500 cal BP фиксируется следующая трансгрессивная фаза. В этот период были образованы выровненная абразионная дуга «Василеостровской террасы» и узкий залив вдоль палеодолины, где в настоящее время располагается русло р. Невы. В этом заливе происходила аккумуляция алевро-песчаных осадков, гранулометрический состав которых свидетельствует о мелководных относительно слабодинамических условиях, характерных для полузамкнутых водных бассейнов, берега которых были благоприятны для рыбопромысловой деятельности людей (Kulkova et al. 2012; Kulkova et al. 2014).

Полученные данные на основе отдельных анализов, а также результатов комплексных исследований доказывают, что периоды трансгрессивных фаз Литоринового моря сменялись периодами регрессии, в ходе которых появлялись участки суши (в частности территория современного устья р. Охты), заселяемые древними людьми. Стоянки древних людей, перекрытых трансгрессивными отложениями Литоринового моря, широко известны не только на территории России, но и в Финляндии, Эстонии, Латвии, Швеции.

Палеогеографическая реконструкция побережья Литоринового моря в регионе Петербурга расширяет наши представления о жизни и промысловой деятельности древнего человека на его берегах. Значительное скопление археологических объектов и находок нескольких тысячелетий на территории современного Охтинского мыса показывает необычайную привлекательность ее для древних людей. В то же время неблагоприятными факторами для постоянного проживания на морском побережье были сильные ветры и сезонные наводнения. Вероятно, здесь находились временные стоянки людей, которые приходили сюда с окрестных земель в промысловых целях. На это указывает и характер памятника и концентрация находок на его изученной части. Но Охтинский мыс – не единственное место в зоне реконструируемой косы, где были обнаружены следы пребывания древних людей. Находки неолитической керамики и каменных отщепов были обнаружены в разное время на левом

берегу р. Невы в районе Смольного монастыря; кремнёвые отщепы были найдены и на возвышенном правом берегу р. Охты напротив мыса.

Древними людьми выбирались наиболее удобные для рыболовства места — в устьях рек, впадавших в лагуны, которые были защищены от разрушительных волн и штормов открытого моря. Здесь происходил сезонный лов рыбы, поднимавшейся весной и летом вверх по течению рек на нерест. Наиболее подходящими местами для лова с использованием заградительных ловушек были устья рек и примыкающие к ним акватории лагун. Остатки деревянных конструкций, приуроченные к нижнему культурному слою могли быть расположены вдоль побережья палеолагуны или в устьях речных протоков, впадающих в нее. Рыболовные заграждения-ловушки представляли собой секции из колов с рейками, перевязанные между собой верёвками из органики, которые достигали в высоту 4 м. При этом другая часть колов, обнаруженных здесь, прежде всего, забитых в грунт на значительную глубину, и остатки деревянных конструкций могли быть связаны со свайными сооружениями – постройками, платформами и мостками, расположенными в прибрежной зоне.

Рыболовные заградительные системы подобного типа встречаются на памятниках эпох мезолита, неолита и раннего металла на побережье восточной Балтики и в лесной зоне России. Они были изучены на торфяниковой стоянке Сарнате в Латвии (Ванкина 1970; Bērziņš 2006); Свянтостских стоянках, Кретуонас 1, Жемайтиске 1-3 в Литве (Pranckenaite 2011); в Финляндии (Koivisto 2011. Рис. 3); на дне озера Аренд в Германии (Leineweber, Lubke 2006: 135); Плехановской стоянке на р. Оке (Федоров 1937), стоянках Становое 4, Сахтыш 2а (Жилин 2004), Замостье 2 на р. Дубне (Лозовская 2011) Караваиха 4 в бассейне оз. Воже (Косорукова 2008), на Мармугинском торфянике на р. Юг (Буров 1969). Такие устройства, известные также в этнографии, перегораживали неглубокие речные, озёрные или морские протоки с медленным течением. При этом, как по размерам, так и по конструкции эти сооружения имели определённые различия, что было связано не только с местной традицией их изготовления и используемыми для этого материалами, но, вероятно, и со способами рыбного лова, применявшимися в различных ситуациях.

Сходное скопление памятников наблюдается в районе Сестрорецкого разлива, где в это же время существовало несколько стоянок. Однако здесь они оказались рассредоточены на значительно большей территории, по берегам рек, впадавших в лагуну. Подобные же скопления объектов эпохи неолита – раннего металла могут прогнозироваться и в устьях других рек, впадавших в залив, где могли возникнуть закрытые косами лагуны. Для уточнения изменений уровня и границ Литоринового моря в регионе Петербурга требуется продолжение комплексных археологических и естественно-научных исследований на этой территории.

Литература

Атлас геологических и эколого-геологических... 2010

Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря / гл. ред. О. В. Петров. СПб : ВСЕГЕИ, 2010

Ауслендер и др. 2002

Ауслендер В. Г., Яновский А. С., Кабаков Л. Г., Плешивцева Е. С. Новые данные по геологии Санкт-Петербурга // Минерал. 2002. Вып. 1 (4). С. 51–58.

Буров 1969

Буров Г. М. О поисках древних деревянных вещей и рыболовных сооружений в старичных торфяниках равнинных рек // КСИА. 1969. 117. С. 133–134.

Ванкина 1970

Ванкина Л. В. Торфяниковая стоянка Сарнате. Рига : Зинатне, 1970.

Герасимов 2006

Герасимов Д. В. Каменный век Карельского перешейка в материалах МАЭ (Кунсткамеры) РАН // Свод археологических источников Кунсткамеры. СПб., 2006. Т. 1. С. 109–188.

Герасимов и др. 2010

Герасимов Д. В., Крийска А., Лисицын С. Н. Освоение побережья Финского залива Балтийского моря в каменном веке // Материалы III Северного археологического конгресса. Екатеринбург; Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2010. С. 28–53.

Геологический атлас Санкт-Петербурга... 2009

Геологический атлас Санкт-Петербурга / ред. М. А. Спиридонов, Н. Б. Филипов. СПб : Комильфо, 2009.

Гусенцова, Сорокин 2011

Гусенцова Т. М., Сорокин П. Е. Охта 1 – первый памятник эпох неолита и раннего металла в центральной части Петербурга // Российский археологический ежегодник, 2011. С. 421–451.

Гусенцова, Сорокин 2012

Гусенцова Т. М., Сорокин П. Е. Новый памятник эпох неолита и раннего металла (Охта 1) в Санкт-Петербурге // Мезолит и неолит Восточной Европы: хронология и культурное взаимодействие. СПб, 2012. С. 182–199.

Джиноридзе 1986

Джиноридзе Р. Н. Диатомовые водоросли из осадков акватории Финского залива // Вестник Ленинградского университета. 1986. Сер. 7. Геология и география. Вып. 3. С. 118–123.

Жилин 2004

Жилин М. Г. Природная среда и хозяйство мезолитического населения центра и северо-запада лесной зоны Восточной Европы. М: Academia, 2004. С. 47–59.

Знаменская 1956

Знаменская О. М. Геоморфологические районы и типы рельефа окрестностей г. Ленинграда // Вестник ЛГУ. 1956. № 24. С. 152–163.

Знаменская, Черемисинова 1974

Знаменская О. М., Черемисинова Е. А. Развитие бассейнов восточной части Финского залива в поздне- и послеледниковое время // Baltica. 1974. № 5. С. 95–104.

Косорукова 2008

Косорукова Н. В. Исследование ранне-неолитического поселения Караваиха 4 в бассейне озера Воже в 2007 г. // Русский Север: вариативность развития в контексте исторического и социально-философского осмысления: материалы межрегиональной научной конференции. 5–6 марта 2008 г. Вологда : Череповецкий гос. ун-т. 2008. С. 13–20.

Кулькова и др. 2010

Кулькова М. А., Сапелко Т. В., Лудикова А. В., Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А., Нестеров Е. М., Гусенцова Т. М., Сорокин П. Е., Гусенцова Т. М., Сорокин П. Е. Палеогеография и археология стоянок неолита – раннего металла в устье реки Охты (г. Санкт-Петербург) // Изв. РГО. 2010. № 142 (6). С. 13–31.

Ленинград. Историко-географический атлас 1977

Ленинград. Историко-географический атлас. М. : Изд-во ГУ геодезии и картографии, 1977.

Лозовская 2011

Лозовская О. В. Деревянные изделия стоянки Замостье 2 // РА. 2011. № 1. С. 15–26.

Малаховский и др. 1989

Малаховский Д. Б., Гей Н. А., Джиноридзе Р. Н., Арсланов Х. А. К палеогеографии голоцена в районе Ленинграда (разрез у Невского лесопарка) // Вестник ЛГУ. 1989. Сер. 7. Геология и география. Вып. 1. С. 92–97.

Малаховский 1995

Малаховский Д. Б. Проблемы возраста и генезиса рельефа северо-запада Русской платформы // Геоморфология. 1995. № 2. С. 44–53.

Марков 1931

Марков К. К. Развитие рельефа северо-западной части Ленинградской области // Тр. Главгеолуправления ВСНХ СССР. 1931. № 117.

Сергеев и др. 2013

Сергеев А. Ю., Гусенцова Т. М., Рябчук Д. В., Сорокин П. Е., Кулькова М. А., Нестерова Е. Н., Жамойда В. А., Спиридонов М. А. Реконструкция палеорельефа береговой зоны Литоринового моря в районе археологического памятника Охта 1 // РАЕ. 2013. № 3. С. 499–523.

Спиридонов 1989

Спиридонов М. А. Ледниковая история Финского залива / Ред. М. А. Спиридонов, А. В. Амантов // Геология субаквальной части зоны сочленения Балтийского щита и Русской плиты в пределах Финского залива. Л. : ВСЕГЕИ, 1989. С. 23–32.

Федоров 1937

Федоров В. В. Рыболовные снаряды неолитической эпохи из долины р. Оки // СА. 1937. № 2. С. 61–70.

Яковлев 1925

Яковлев С. А. Наносы и рельеф г. Ленинграда и его окрестностей. Л. : Изд-во Научно-мелиорационного института, 1925.

Bērzins 2006

Bērzins V. Zusu zeberklu un zvejas aizprostu detalas no Sarnates neolita armetnes // Arheologija un etnografija. 2006. Vol. 23. Pp. 49–58.

Koivisto 2011

Koivisto S. Prehistoric Wetland Archaeology in Finland: Sites and Settlement in a Changing Environment // Wetland Settlements of the Baltic. Vilnius, 2011. Pp. 31–54.

Kulkova et al. 2012

Kulkova M., Gusentsova T., Nesterov E., Sorokin P., Sapelko T. Hronology of neolithic-early metal age sites at the Okhta river mouth (Saint Petersburg, Russia) // Radiocarbon. 2012. Vol. 54. Nr. 3–4. <https://journals.uair.arizona.edu/index.php/radiocarbon/index>. Accessed: 01. 02. 2015

Kulkova et al. 2014

Kulkova M. A., Gusentsova T. M., Sapelko T. V., Nesterov E. M., Sorokin P. E., Ludikova A. V., Ryabchuk D. V., Markova M. A. Geoarcheological investigations on the development of the Neva River delta (Gulf of Finland) during the Holocene // Journal of Marine Systems. 2014. Vol. 129. Pp. 19–34.

Leineweber, Lubke 2006

Leineweber R., Lubke H. Unterwasserarchalogie in der Altmark // Archäologie in Sachsen-Anhalt-Fundorkarte. 2006 (2007). Bd. 4/I. Pp. 127–138.

Miettinen et al. 2007

Miettinen A., Saveliev L., Subetto D. A., Dzhinoridze R., Arslanov K. Palaeoenvironment of the Karelian Isthmus, the easternmost part of the Gulf of Finland, during the Litorina Sea stage of the Baltic Sea history // Boreas. 2007. Vol. 36. Pp. 441–458.

Pranckenaite 2011

Pranckenaite E. Prehistoric Archaeology of Wetlands in Lithuania // Wetland Settlements of the Baltic. Vilnius, 2011. Pp. 93–111.

Rosentau et al. 2013

Rosentau A., Muru M., Kriiska A., Subetto D., Vassiljev J., Hang T., Gerasimov D., Nordqvist K., Ludikova A., Lõugas L., Raig H., Kihno K., Aunap R., Letyka N. Stone Age settlement and Holocene shore displacement in the Narva-Luga Klint Bay area, eastern Gulf of Finland // Boreas. 2013. N 42 (4). Pp. 912–931.

Ryabchuk et al. 2014

Ryabchuk D., Zhamoida V., Amantov A., Sergeev A., Gusentsova T., Sorokin P., Kulkova M. and Gerasimov D. Development of the coastal systems of the easternmost Gulf of Finland, and their links with Neolithic-Bronze and Iron Age settlements // Geological Society, London, September 29, 2014; doi 10.1144/SP411.5.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В АРХЕОЛОГИИ

DATA PROCESSING AND MODELING IN ARCHAEOLOGY

М. Н. Дараган

Институт археологии НАН Украины, Украина /
Немецкий археологический институт, Германия

ОПЫТ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ КУРГАННЫХ СООРУЖЕНИЙ ЭПОХИ ЭНЕОЛИТА – РАННЕЙ БРОНЗЫ

До последнего времени реконструкции многих утраченных объектов историко-культурного наследия нередко выполнялись в виде зарисовок на бумаге или настольных макетов, которые достаточно условно отображали общий вид не дошедших до нас памятников. Большая часть важнейших археологических данных документировалась в виде фотографий и чертежей сохранившихся структур, причём при сопоставлении одних с другими выявлялось много нестыковок и ошибок. Компьютерные технологии открыли новые возможности для визуализации древних сооружений путём их воссоздания (моделирования) в трёхмерном виртуальном пространстве. Компьютерное моделирование возможно, в принципе, для любого археологического (исторического) памятника, частично сохранившегося или же полностью утраченного. Для пространственного позиционирования необходимо прежде всего наличие планового решения, а дальнейшая точность 3D-модели зависит от полноты зафиксированного археологического материала. На сегодняшний день 3D-реконструкция даёт возможность качественно изменить способ документирования древних сооружений, поскольку при построении 3D-модели любая нестыковка сразу оказывается очевидной. Кроме того, трёхмерная реконструкция памятников археологии позволяет продемонстрировать возможный облик памятника в разные периоды его существования, обозначить неизученные стороны памятника, что особенно актуально при реконструкции этапов сооружения древнейших курганов.

Древнейшие курганы в степной зоне Северного Причерноморья появляются в эпоху энеолита в 4-м тыс. до н. э., предшествуя массовому курганному строительству, начавшемуся здесь в эпоху ямной культуры. Степи междуречий, практически лишённые постоянных водных источников, были непригодны для устройства долгосрочных мест поселения. Как следствие, для археологических культур Степи курганы являются основным, а часто и единственным источником для реконструкции не только погребальной практики, но и различных аспектов мировоззрения, социальной структуры и хозяйства древних коллективов.

Первые степные курганы имели небольшие размеры, а по устройству могил и сопровождающим вещам в погребениях были очень скромными. Однако ряд характерных признаков древнейших курганов, связанных в первую очередь с оформлением подкурганного пространства (стремление придать ему антропоморфную или же зооморфную форму, сооружение ограничивающего насыпь рва, устройство кромлеха, а также сооружение святилищ, использование огня в погребальном ритуале), позволяет видеть в них весьма сложные комплексы, отражающие непростую систему идеологических и космогонических представлений (Ковалёва 1994. С. 84; Rassamakin 2004; Берестнёв 2005).



В курганах ямной культуры с одной стороны прослеживаются отдельные черты предшествующего времени, с другой – вырабатывается ряд собственных приёмов (Ковалёва 1994. С. 85). В эту эпоху ямной культуры увеличивается насыпь кургана и усложняется характер его сооружения. По сравнению с энеолитическим временем значительно реже устраиваются окружающие рвы и кромлехи, в единичных случаях в погребальном обряде используется огонь. В то же время строительство многих ямных курганов сопровождается различными ритуальными действиями, связанными с оформлением и освящением будущего подкурганного пространства, а также с сооружением монументальных рельефных изображений на тех или иных этапах строительства насыпей. Выделение подкурганной площадки производится путём снятия чернозёма по заранее заданной форме, для которой свойственно стремление к антропоморфизму (Ковалёва и др. 1989. С. 24; Андросов 1989. С. 45; Полин, Черных 2009. С. 37).

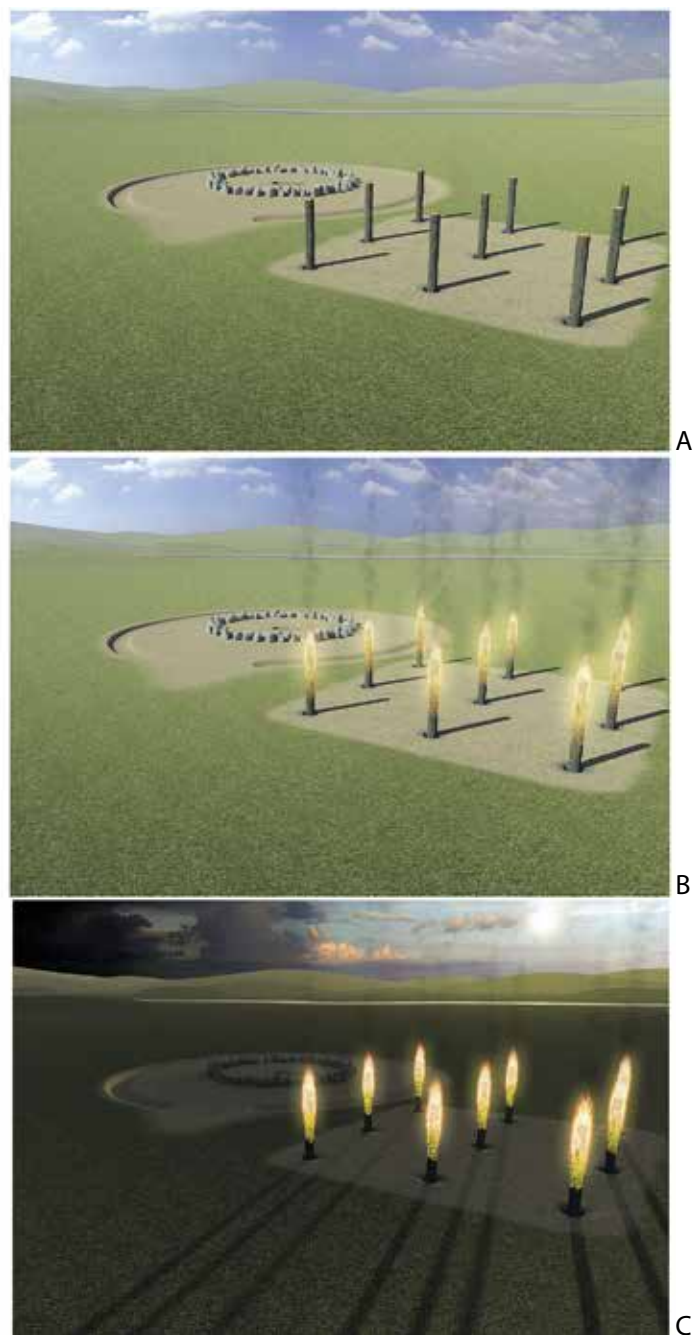


Рис. 3.
Трёхмерное моделирование этапа 1

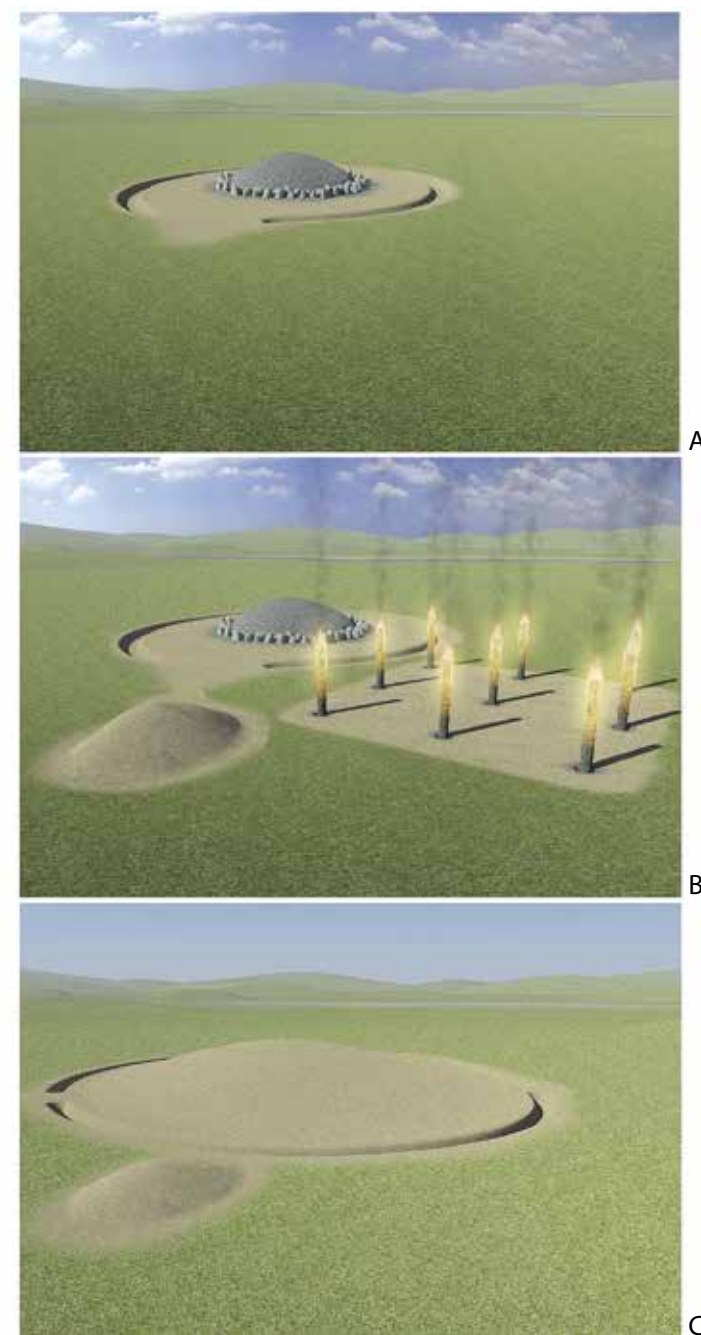


Рис. 4.
Трёхмерное моделирование этапов 1–3

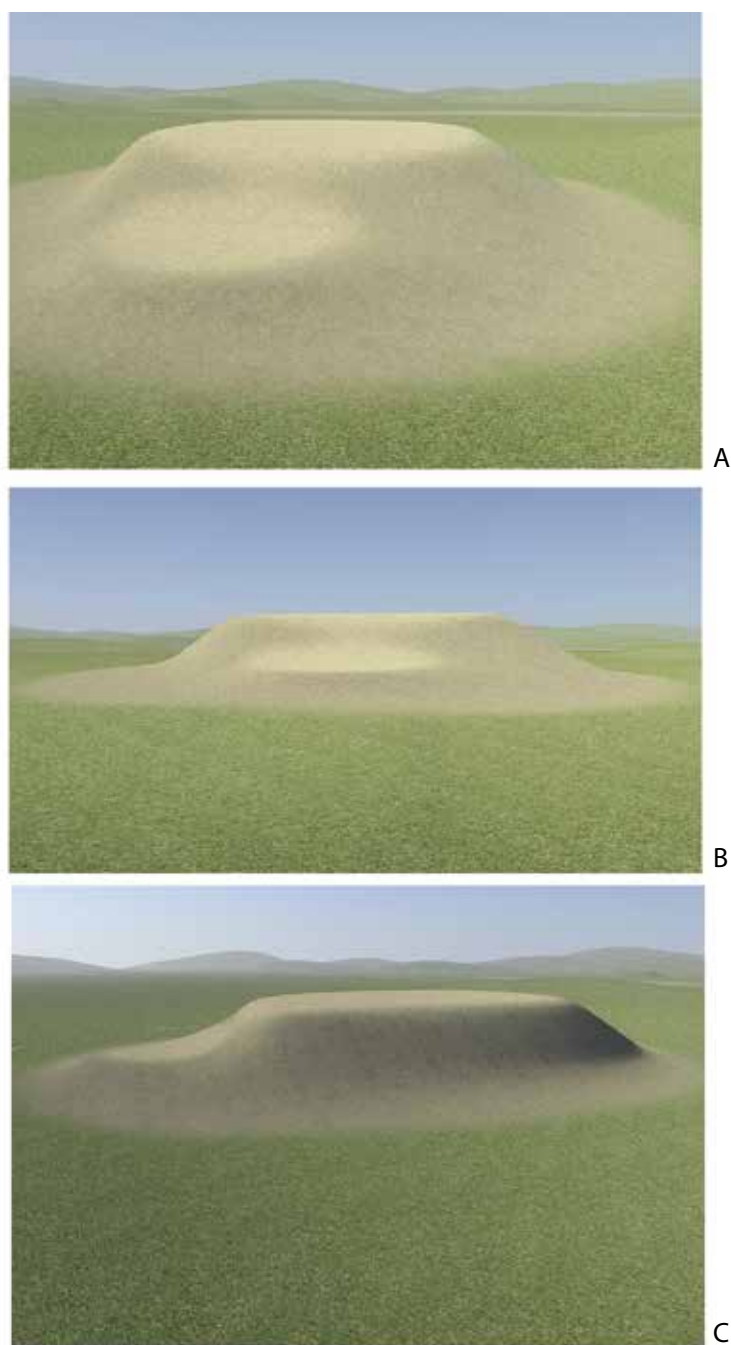


Рис. 5.
Трёхмерное моделирование этапа 4

захоронений и новой досыпкой курган увеличивался в размерах и часто менял свои очертания. Особенностью погребального обряда являются сохранившиеся выкиды из могильных ям, различные следы погребальных церемоний – остатки костров и поминальных тризн в виде скоплений обломков керамики и костей животных. «Ни один курган эпохи энеолита-бронзы не насыпался шапками и не является кучей просто насыпной земли. Каждый из них представлял собой технически сложную конструкцию, сооружённую по заранее намеченному плану из дёрна, дёрна и камня, дёрна и дерева или совокупности всех этих материалов. Существовала определённая технология строительства насыпей, сохранявшаяся на протяжении многих поколений. И большинство технических приёмов строительства насыпей и сопутствующих конструкций возникают на заре курганного строительства...» (Мозолевский, Полин 2005. С. 198–199). В завершённом виде насыпи курганов эпохи бронзы нередко представляли собой монументальные сооружения, многие достигали 8–12 м в высоту, возведение их требовало значительных затрат времени и физических усилий. Такие многослойные насыпи исключительно важны во многих отношениях, в том числе они необходимы для выяснения размеров и технологии сооружения первичных курганов, поскольку в них, в отличие от однослойных курганов, первичная насыпь не потревожена вспашкой и полностью сохраняет свой первоначальный облик (Шапошникова и др. 1986. С. 11).

Практически каждый курган эпохи бронзы в разрезе выглядит как слоёный пирог, каждый слой которого, будучи связанным с отдельным погребением, часто имеет характерные, только ему присущие черты. Но дошедшие до нас насыпи курганов Северного Причерноморья в определённой степени отражают только облик, связанный с их последними досыпками. Многочисленными раскопками курганов установлено, что сохранившиеся под позднейшими досыпками в первозданном виде первичные насыпи энеолитической и ямной эпох имели различные очертания: преимущественно округло-выпуклые, иногда несколько вытянутые, овальные, либо иные плавно-фигурные в основании формы, а также насыпи в виде усечённого конуса. Впрочем, несмотря на многочисленные исследованные курганы, не каждый из них можно корректно восстановить, хотя отдельные графические реконструкции насыпей древнейших курганов, безусловно, известны (Пустовалов, Рассемакин 1990; Пустовалов 1999). На сложности в реконструкции истории сооружения курганов, связанных с уровнем отображения стратиграфии профилей, уже обращалось внимание специалистов (Кореневский 2010).

На материалах исследованного в 2003 году Орджоникидзевской экспедицией ИА НАНУ (руководитель С. В. Полин) кургана № 29 у хутора Шевченко предпринята реконструкция внешнего вида древнейших курганов и святилища, построенных в степной зоне Северного Причерноморья носителями энеолитической и древнеямной культур.

Курган высотой 4,5 м находился на первой надпойменной террасе левого коренного берега р. Солёной в 200 м от берегового обреза (хут. Шевченко, Никопольский р-н Днепропетровской области, Украина) (рис. 1) (Черных, Дараган 2014. С. 76). Согласно реконструкции Л. А. Черных, в кургане выделяется 7 строительных горизонтов (Черных, Дараган 2014. С. 77–85. Рис. 154). В цифровом виде восстановлено четыре первых этапа сооружения кургана: три этапа, связанные со строительством насыпей над тремя погребениями эпохи среднего энеолита и четвёртый этап, связанный со строительством насыпи над погребением ямной культуры. Также предложена реконструкция святилища эпохи среднего энеолита. Построение виртуальной реконструкции

проводилось на основе данных археологических исследований (рис. 2), что позволило представить объект в его эволюции, для отдельных этапов развития¹.

Насыпи № 1–3, сооружённые над тремя погребениями (№ 20, 21, 22) и святилищем эпохи среднего энеолита.

Этап 1.

Самая ранняя насыпь была возведена над погребением № 22. Одновременно с погребением был сооружён кромлех из каменных плит и неглубокий ров. С юго-восточной стороны кромлеха, окружавшего первичную насыпь, был сооружён культовый комплекс. От культового комплекса сохранились девять столбовых ям, расположенных квадратом. Ямы были достаточно глубокими, их реальная глубина (с поверхности площадки) равнялась примерно 1,38–1,5 м. В ямах на дне были вертикально установлены довольно толстые столбы. Нижняя часть столбов плотно закреплялась в придонной части ям между уступом и каменной забутовкой на высоте 0,55–0,95 м. Высота столбов над поверхностью земли неизвестна. Но диаметр столбов и плотное крепление их нижней части позволяют допустить, что они достигали в высоту человеческого роста (рис. 3А) (в реконструкции Л. А. Черных они предназначались для несения значительной нагрузки (Черных, Дараган 2014. С. 275)).

Во время проведения определённого ритуала столбы были подожжены и сгорели полностью – до уровня уступов и забутовки. Это позволяет предполагать, что столбы горели длительное время. Нами предложен вариант реконструкции, отражающий этап сожжения столбов (рис. 3В–С), проведённый в дневное и вечернее время. Возможен и более сложный вариант, предложенный Л. А. Черных, согласно которому столбы горели вместе с нанизанными на них тушами быков (Черных, Дараган 2014. С. 275). Основанием для такого предположения являются фрагменты обгоревших бычьих костей, найденные в заполнении ям.

Этап 2.

На следующем этапе был сооружён курган над погребением № 22. Объективно длительность функционирования культового комплекса неизвестна. Установлена только его синхронность с погребением № 22, прекратило ли своё существование святилище ко времени сооружения насыпи кургана над погребением № 22, археологически не определяется. Данный этап включает несколько возможных вариантов реконструкции хронологической ситуации. В первом варианте реконструкции курган над погребением № 22 насыпан после завершения функционирования культового комплекса (рис. 4А). При этом грунтовая насыпь первоначально находилась внутри кромлеха, и только спустя некоторое время насыпь расползлась за его пределы². Согласно реконструкции Л. А. Черных, не исключён и второй вариант развития событий, предполагающий сооружение одновременно с насыпью кургана над погребением № 22 ещё одного кургана, насыпанного над погребением № 20 (насыпь 2). Детское

¹ Работы были выполнены при участии Владимира Балкашина. Использовались программы AutoCAD, 3D Studio MAX и Adobe Photoshop.

² Несмотря на то что при исследованиях энеолитических курганов с кромлехами в стратиграфических разрезах часто фиксируются насыпи уже перекрывающие (частично или полностью) плиты кромлеха, в ряде случаев было установлено, что первоначально насыпь была внутри кромлеха (Петренко 1983. С. 27. Рис. 1.1).

погребение № 20 было совершено с уровня древнего горизонта к югу от первичной насыпи и перекрыто низкой насыпью (насыпь 2) из плотного светло-серого грунта овальной в плане формы, вытянутой по линии С–Ю. Хронологическую последовательность погребений № 22 и 20 установить сложно. В этом варианте предполагается синхронность погребений № 21 и 22 с расположением культового комплекса со столбовыми ямами между насыпями, сооружёнными над этими погребениями (рис. 4В).

Этап 3.

Следующий этап в сооружении кургана связан со строительством насыпи над погребением № 21. Погребение № 21 было впущено в центральную часть первой насыпи, возведённой над погребением № 22, и устроено в её грунте. Насыпь, возведённая над погребением № 21, была окружена ровиком с двумя перемычками, она полностью и симметрично перекрывала первичную насыпь и частично – святилище. Таким образом, образовалось две рядом стоявших насыпи (2 и 3) с вершинами высотой около 1,37 м (северная) и около 0,25 м (южная), оплывшие полы которых слились над южной дугой заплывшего ровика, окружавшего вторую насыпь (рис. 4С).

Насыпь № 4, сооружённая над погребением ямной культуры.

Этап 4.

На этом этапе в ложбину между двумя энеолитическими насыпями было впущено древнейшее ямное погребение № 23. Насыпь, возведённая над этим погребением, в плане была округлой, по основанию крутых склонов почти полностью перекрывала оба энеолитических кургана. Её максимальная высота в центре над ложбиной между энеолитическими курганами – 2,7 м, диаметр по основанию крутых склонов – 30 м по линии С–Ю и около 27 м по линии В–З. Довольно крутые склоны насыпи у основания плавно переходили в очень пологую подошву, перекрывавшую северный склон второй энеолитической насыпи и сливавшуюся с поверхностью южного склона третьей энеолитической насыпи. Подошва была неровно скрыта по окружности при следующем этапе строительства кургана и сохранилась в радиусе от 1,7 до 6 м от основания склонов.

Если прослеженные энеолитические насыпи были округлой или овальной формы, то насыпь, возведённая над погребением № 23, имела вид срезанного конуса с узко-вытянутой горизонтальной площадкой на вершине и с уступом (ступенькой) на пути восхождения к этой площадке (рис. 5А–С). Вершина насыпи имела вид уплощённой горизонтальной площадки длиной около 12 м и шириной не более 5–6 м, вытянутой по оси С–Ю. Эта площадка была выстлана слоем светлого глинистого грунта толщиной 0,1–0,15 м. Погребение № 23 находилось практически под центром этой площадки. Уступ – ступенька шириной около 4 м – был устроен на поверхности юго-восточного склона насыпи, на 1–1,5 м ниже уровня горизонтальной площадки. Он чётко читался в профилях 1-й восточной бровки (профили № 5–6: рис. 2). В дальнейшем склон и длинная подошва этой насыпи задерновались, что свидетельствует о том, что святилище функционировало длительное время.

Наряду с округлой формой насыпи, коническая форма кургана появляется ещё в энеолите (Rassamakin 2004; Андросов и др. 1991. С. 4). В эпоху ямной культуры курганы усечённо-конической формы с плоской горизонтальной верхней площадкой, видимо, были типичны для степной зоны Украины, хотя общий их процент среди исследованных курганов неизвестен (Черняков 1985. С. 373; Андросов, Мельник 1991. Рис. 2.2; Bunjatian et al. 2006; Елинова и др. 1984. С. 19–20; Шапошникова и др. 1986. С. 11; Мельник, Стеблина 2012. С. 139–140). Исследованы в степи и курганы, насыпи

и утрамбованные верхние площадки которых были обмазаны толстым слоем глины. Например, так была оформлена четвертая насыпь кургана «Бакумова Могила» у с. Маяки. Обмазка слоем глины толщиной от 10 до 15–30 см прослеживалась по всей насыпи кургана. На срезанной горизонтальной вершине кургана была сооружена мощная, толщиной до 30–35 см глиняная горизонтальная площадка диаметром до 10 м (Черняков 1982. С. 43). В кургане № 22 у с. Глухое три последовательные насыпи кургана имели вершины в виде срезанных горизонтальных площадок и были облицованы слоем жёлтой глины мощностью 50 см (Елинова и др. 1984. С. 44–45). Оба кургана в законченном виде имели высоту 7 м.

Начиная с эпохи ранней бронзы известны курганы с плоской вершиной и на Северном Кавказе. Часто именно так выглядели большие майкопские курганы: Заманкульский курган № 2, курган G и перекрывший его гигантский курган № 11 в урочище Клады, Нальчикский курган, насыпь 5 Большого Ипатовского кургана и др. (Кореневский 2010; Ростунов 2007. С. 118; Кореневский и др. 2007. С. 27). Как и в Северном Причерноморье, у большинства северокавказских курганов с плоской вершиной фиксируется обмазка поверхности насыпи слоем ярко-жёлтой глинистой обмазки (Ростунов 2007. С. 119).

Если курганы с плоскими вершинами в Северном Причерноморье сравнительно широко известны, то курган с уступом зафиксирован и документально подтверждён едва ли не впервые. Форма и структура насыпи такого кургана, видимо, свидетельствуют о том, что он использовался не только как место захоронения, но и как святилище, связанное с отправлением определённых культовых действий. Непосредственно на Правобережье Нижнего Поднепровья в ряду ямных курганов зафиксированы пандусы, алтарные площадки с вымосткой из дерново-грязевых вальков, дорожки, ведущие к ним (Григорьевка II, к. 4, «Голая Могила», курган у ст. Моисеевка) (Ковалёва 1994. С. 85; Андросов, Мельник 1991. С. 37). На Северном Кавказе пандус был зафиксирован в Заманкульском кургане № 2. Пирамидальная конструкция насыпи № 1 была снабжена винтовым подъёмом на плоскую вершину. Его ширина составляла 3–4 м, а плоская вершина равнялась 8–10 м. Предполагается использование памятника как места для восхождения на него людей с культовыми целями (Кореневский 2010. С. 166–167; Ростунов 2007. С. 118–119).

Прослеженные в кургане № 29 различные аспекты, связанные с архитектурой древнейших курганов эпохи энеолита и ранней бронзы, подтверждают вывод, что курган – это не только сложное архитектурное сооружение, но и полифункциональный объект. Кроме основной – погребальной – функции, курганы выполняли и функцию святилищ – мест для отправления поминальных и других ритуалов.

Литература

Андросов 1989

Андросов А. В. Курганы с антропоморфной конструкцией из района с. Кисличеватая // Проблемы археологии Поднепровья. Днепропетровск : ДГУ, 1989. С. 45–52.

Андросов и др. 1991

Андросов А. В., Марина З. П., Завгородний Д. И. Энеолитический курган (2500–1800 лет до н. э.) у села Богуслав в Присамарье // Проблемы археологии Поднепровья. Днепропетровск : ДГУ, 1991. С. 4–19.

Андросов, Мельник 1991

Андросов А. В., Мельник А. А. Курганы раннего бронзового века с зооморфными конструкциями // Проблемы археологии Поднепровья. Днепропетровск : ДГУ, 1991. С. 35–50.

Берестнёв 2005

Берестнёв С. И. К проблеме курганов и курганной стратиграфии // Древности 2005. Харьков: Харьковское историко-археологическое общество НМЦ «МД», 2005. С. 97–115.

Елинова и др. 1984

Елинова Л. П., Голубчик Л. Н., Чурилова Л. Н. Отчёт об археологических раскопках музея на землях Марганецкого горно-обогатительного комбината в 1984 г. // НА ИА НАНУ. 1984. Вып. 101.

Ковалёва и др. 1989

Ковалёва И. Ф., Андросов А. В., Шалобудов В. Н., Мартюшенко Д. В. Курганы эпохи бронзы степного Правобережья Днепра // Проблемы археологии Поднепровья. Днепропетровск : ДГУ, 1989. С. 4–26.

Ковалёва 1994

Ковалёва И. Ф. Курганный строительный комплекс в энеолите-раннем бронзовом веке // Древнейшие общности земледельцев и скотоводов Северного Причерноморья V тыс. до н.э. – V в. н.э. Тирасполь, 1994. С. 84–85.

Кореневский 2010

Кореневский С. Н. Феномен больших майкопских курганов: социально-трудовой и культовый аспекты строительства // КСИА. 2010. Вып. 224. С.149–170.

Кореневский и др. 2007

Кореневский С. Н., Белинский А. Б., Калмыков А. А. Большой Ипатовский курган на Ставрополье. М. : Наука, 2007.

Мельник, Стеблина 2012

Мельник О. О., Стеблина І. О. Кургани Криворіжжя. Кривий Ріг : Видавничий дім, 2012.

Мозолевский, Полин 2005

Мозолевский Б. Н., Полин С. В. Курганы скифского Герроса IV в. до н. э. (Бабина, Водяна и Соболева Могилы). Киев : Стило, 2005.

Петренко 1983

Петренко В. Г. Архитектурные особенности некоторых курганов Усатово // Материалы по археологии Северо-Западного Причерноморья. Киев, 1983. С. 22–32.

Полин, Черных 2009

Полин С. В., Черных Л. А. Конструктивные особенности первичных насыпей ямных курганов у с. Владимировки и у г. Орджоникидзе // Проблемы археології Подніпров'я. Збірка на пошану І. Ф. Ковальової. Дніпропетровськ, 2009. С. 37–47.

Пустовалов 1999

Пустовалов С. Ж. Молочанське святилище // Проблемы археології Подніпров'я. Дніпропетровськ : ДГУ, 1999. С. 104–118.

Пустовалов, Рассамкин 1990

Пустовалов С. Ж., Рассамкин Ю. А. О реконструкции религиозных представлений в эпоху средней бронзы в Северном Причерноморье // Проблемы изучения катакомбной культурно-исторической общности : тезисы докладов всесоюзного семинара. Запорожье, 1990. С. 81–84.

Ростунов 2007

Ростунов В. Л. Эпоха энеолита-средней бронзы Центрального Кавказа // Опыт реконструкции сакрального пространства ранних курганов Европы и Северного Кавказа. Владикавказ, 2007. Т. 3.

Шапошникова и др. 1986

Шапошникова О. Г., Фоменко В. Н., Довженко Н. Д. Ямная культурно-историческая область (южно-бугский вариант). Киев, 1986 (САИ, В 1–3).

Черных, Дараган 2014

Черных Л. А., Дараган М. Н. Курганы эпохи энеолита-бронзы междуречья рек Базавлук, Солёная и Чертомлык. Киев / изд. О. Филюк, 2014. (Курганы Украины. Т. 4).

Черняков 1985

Черняков И. Т. Исследования на Нижнем Днестре // Археологические открытия 1983 года. М. : Наука, 1985. С. 373.

Bunjatian et al. 2006

Bunjatian K. P., Kaiser E., Nikolova A. V. Bronzzeitliche Bestattungen aus dem Unteren Dnepergebiet // Schriften des Zentrums für Archäologie und Kulturgeschichte des Schwarzmeerraums 8. Langenweissbach ; Beier ; Beran, 2006.

Rassamakin 2004

Rassamakin Ju. Ja. Die nordpontische Steppe in der Kupferzeit. Greber aus der Mitte 5. Jts. Bis Ende des 4. Jts v. Chr. Teil I – Text. – Archäologie in Eurasien. Bd 17. Deutsches Archäologisches Institut. Eurasien-Abteilung. Mainz : Verlag Philipp von Zabern, 2004.

M. Raykovska

New Bulgarian University, Bulgaria

G. Bevan

Queen's University, Canada

I. Vasiliev

Balkan Heritage Foundation, Bulgaria

INTEGRATION OF DIFFERENT COMPUTATIONAL PHOTOGRAPHIC MODALITIES IN HIGH-ACCURACY 3D BUILDING MODELS: THE CASE OF THE CHURCH OF ST. PETKA, BULGARIA

1. Introduction

With the advent of high-resolution digital cameras and fast, multi-core computers in the early 2000s, digital photogrammetry has rapidly become a de facto standard documentation technique in archaeology and architecture, and published case studies now abound (Martinez et al. 2013; Baptista 2013; Giuliano 2014; Spring, Peters 2014; Harrower et al. 2014). Several features have made photogrammetry obviously attractive over similar 3D recording techniques (Doneus et al. 2011; De Reu et al. 2013): high accuracy, low cost, compared with Lidar scanners, and relative ease of use for those with good technical photography skills. A fourth attractive feature should also be considered. Photogrammetry is a fundamentally image-based 3D recording technique. Unlike Lidar where images taken by calibrated cameras are draped on 3D geometry derived from millions of discrete range-points, dense stereo-matching between rectified images itself generates the geometry.

The advantages of image-based 3D recording are twofold. First models can be stored as 2D image sets, thereby making archiving and monitoring data integrity more intuitive. When 3D data is required, images can be matched and geometry generated, but there is no requirement that the projects be stored as anything other than images with their associated metadata. Second, because the interior orientation (distortion characteristics) and exterior orientation (camera position and pose) are known, the images used for photogrammetry can be used for other types of measurement and features identified on the photos easily mapped into real-world coordinates, a boon for both archaeologists and conservators. This last feature is of tremendous importance in addressing the challenge of integrating different forms of recording into a single virtual reconstruction of a building or archaeological site (Remondino, Rizzi 2010; Remondino 2011).

Herewith is a modest contribution not only to demonstrate, once again, the most obvious advantages of photogrammetry in field recording, but also to point the way towards

the integration of different modalities of computational photography: Reflectance Transformation Imaging (henceforth RTI) and Colour Decorrelation. The Church of St. Petka outside of Sofia, Bulgaria, provided a nearly ideal case for putting photogrammetry and related technologies to the test.

2. The church of Sveta (Saint) Petka

The ruins of the Church of St. Petka are located in the Sofia District in the village of Balsha, some 25 km from downtown Sofia, Bulgaria. The church dates to the late 16th or early 17th century and was severely damaged during an earthquake in the 19th century (most probably in 1858). The locals continued using the damaged structure for worship until the new church, dedicated to the same saint, was built adjacent in the 1920 (fig. 1). In 1965 the non-functioning, ruined Church of St. Petka was declared a protected monument of cultural heritage and, in 1966, the ruins were safeguarded by the construction of an enclosure, repaired in 2012 along with the erection of a new fence on the east and west openings of the enclosure.

The church, typical for the late medieval period in the Balkans under the Ottomans, is a single-nave, rectangular, barrel-vaulted structure, oriented west-east according to Orthodox custom, and is dug partly into the slope (fig. 7a). The vault was perhaps once covered with lead roofing. The floor is covered by red square ceramic tiles. Three windows and two niches are found on the south wall, one niche on the west wall, and one window in the apse. The upper halves of the north wall and the apse, as well as more than three quarters of the vault are now lost.

The entire interior of the church was once covered with frescoes painted at the beginning of the 17th century. Today fresco plasters are preserved mostly on the west wall, although they are very faded. The iconography is not exceptional for the period and the region. Fragments from the Annunciation and Adoration of the Lamb are found in the apse. The patron saints of the Orthodox Church and the Old Testament Trinity are found on the north wall (which was restored in 2009). The Prophet Elijah, a Stylite saint, the Archangel Michael and the Dormition of the Virgin Mary, and probably Saints Constantine and Helena are found on the west wall.

The first publication of the monument was in 1939 by the Bulgarian archaeologist and architect Krastyu Miyatev (Миятев 1939). Later the Bulgarian architect Dafina Vasileva examined the church's architecture and published two other ecclesiastic monuments from Balsha that dated to the same time (Василева 1972). In 1986 Romyana Pobornikova excavated the site and unearthed the church's narthex and the surrounding necropolis, which had been in use at least from the 17th to 19th centuries (Поборникова 1994, с. 120). In 2008 the Balkan Heritage Foundation (BHF) included St. Petka's in its annual program for the documentation of abandoned medieval monuments in Western Bulgaria by means of architectural drawing and conventional digital photography.

3. Recording of St. Petka's in 2014

3.1 Reflectance Transformation Imaging

Since its development at HP Labs in 2001 (Malzbender et al. 2001), RTI, and its underlying algorithms of Polynomial Texture Mapping (PTM) and Hemispherical Harmonics (HSH), have been widely adopted in archaeology and art conservation to document very fine surface details on a wide range of materials that are difficult or impossible to capture with other 3D techniques, such as laser scanning (Earl et al. 2010; Gabov, Bevan 2011; Zaccagnino et



Fig. 1.
Old (right) and new (left) Churches of St. Petka (photo by Plamen Petrov)

al. 2012; Bevan et al. 2013). Collaboration between the University of Minho in Portugal and Cultural Heritage Imaging of San Francisco brought highlight-based RTI into popular use in 2006 (Mudge et al. 2006). This technique replaced the domes of lights commonly used indoors with a flexible technique that is easy to set up in the field. It requires only a camera on a robust tripod, a remotely triggered flash and shutter release, and a reflective black sphere, like a snooker ball, placed somewhere in the field of view (fig. 2).

While not a 3D technique like laser or structured light scanning in the sense that, at least at the present, RTI does not generate a cloud of accurate measurements in 3D space, it does measure surface normals for each pixel of the area photographed. This surface normal field, which when generated with high-order polynomials like HSH, can be very accurate (Manfredi et al. 2013) when compared with PTM (MacDonald, Robson 2010), permits not only the virtual, dynamic relighting of the image in software, but the application of a whole host of other contrast enhancing filters, such as Specular Enhancement, a version of the Phong Shader Model, the RTIViewer software. What is more RTI has the distinct



Fig. 2.
RTI capture of the apse of St. Petka's in June of 2014 (photo by Nikolai Zlatanov)

advantage that, when used with high-resolution DSLRs, such as the 36mp Nikon D800e used in the present project with a 70–180 mm Nikkor macro lens, the ground sample size for each normal measurement can be less than 50 microns. Hence, RTI can reveal very minute disruptions in a surface, such as shallow incisions on a plaster wall, that are impractical to measure in the field with other scanning modalities (Manfredi et al. 2014).

On the present project areas of unrestored fresco were inspected for signs of graffiti and individual RTI image sets (approximately RAW 80 images) captured with a long focal length macro lens to ensure the camera was well away from the orbit of the light (fig. 2). Many RTI captures were performed on the interior frescoes on the south and west walls, and later processed in RTIBuilder (Version 2.0.2). The Specular Enhancement filter on an RTI capture from the apse can both reveal difficult-to-read graffiti as well as the surviving topography of the fresco, e.g. brushstrokes (Figures 3a and 3b). The only RTI capture made on the exterior of the church was of a spolia block embedded in the corner of the north wall with four lines of still undeciphered Cyrillic text (Figures 4a and 4b).

3. 2. Close-range photogrammetry

Close-range photogrammetry was undertaken to model in 3D all exposed surfaces of St. Petka's, both interior and exterior. A Nikon D800e DSLR camera was used with a 24 mm

f/2.8 Nikkor lens. In order to obtain complete photographic coverage a monopod was used along with a remote shutter release (fig. 5). The enclosure presented a challenge for lighting so a pair of high-output AlienBees 1600w strobes with umbrellas were used to provide even illumination. The strobes were only moved when they obstructed the field of view of the camera so that the lighting scene for each wall was as similar as possible. Four points shot with a total station on the exterior of the church provided geo-referencing for the model.

The 36 mega-pixel sensor of the D800e ensured that, even though a wide angle lens was used, a ground sample size of 0.1 mm could still be obtained with photos taken at a distance of no more than 0.5 m from the wall, and no more than 0.5 m apart. The 24 mm lens was selected to guarantee a strong base-to-distance ratio of 1:1 such that a priori measurement accuracies in-plane and in-depth of less than 1 mm could be hoped for (Birch 2006 and Matthews, Noble 2008). As recent empirical studies have shown, Agisoft Photoscan (Version 1.0.4 Build 1847), the software chosen for the dense reconstruction of the model, is capable of this level of accuracy at close range (Koutsoudis et al. 2014; Remondino et al. 2014).

In order to increase the speed of photo alignment, the lens and camera were pre-calibrated from a sub-set of 60 photos with ADAM Technologies 3DM CalibCam v.2.5, which uses Least Squares Matching to achieve calibration accuracies down to a sigma of 0.15 pixels (Birch 2006); Least Squares has distinct advantages in terms of accuracy over the Semiglobal Matching used by Photoscan (Dall'Asta, Roncella 2014). This brought the reprojection error in Photoscan down to an average of 0.2 pixels with outlier values of no more than 0.8 (outlier observations were further eliminated in Photoscan using the "Gradual Selection" tool). Coded targets were also used to provide quick, high-accuracy alignment between the interior and exterior models, as well as an additional check on scaling. Fourteen targets were placed in the doorway in the west wall, the windows of the south wall and on top of the east and north walls so that they could be seen in photos taken from the inside and outside of the church.

The resulting dense point cloud, built at "medium" in Photoscan, produced over 24.5 million points (fig. 6). The preliminary results show a close correspondence between the hand-measured top plan (fig. 7a) and a cross section derived from the point cloud (fig. 7b). Obvious differences are visible, however. Since it was difficult to get adequate photographic coverage of the diaconicon niche in the east wall due to confined quarters and poor illumination, it was not properly modelled and appears as triangular rather than rectangular. Elsewhere, however, the point cloud corresponds almost perfectly with the hand-drawn plan. In the case of the west exterior façade (fig. 8a) we can see that the photogrammetric model corresponds closely with the hand drawing (fig. 8b). Divergences are noted on the roof line and the niche, where exact hand measurements were more difficult to perform. Inadequate photo coverage on the bottom of the façade also meant that there was a gap in the point cloud.

3. 3. Colour decorrelation

Because the overlapping imagery of the interior was not acquired, in the first instance, to provide properly composed photos of each mosaic panel but instead to ensure proper stereo overlap, it was necessary to take these overlapping images and create a multiple-viewpoint mosaic of them for further study. While several software packages offer robust multi-viewpoint stitching functions based on SIFT or similar point matching algorithms, such as Hugin and PTGui (based on PanormaTools), or AutoPano Giga, the Microsoft



a



b

Fig. 3:
a – Graffiti on the apse, unenhanced;
b – Specular Enhancement of the graffiti on the apse



a



b

Fig. 4:
a – Spolia inscription on the north exterior wall of St. Petka's, unenhanced;
b – Specular Enhancement of the spolia inscription

Image Composite Editor (Version 1.4.4) was selected for its speed and accurate results with small numbers of images (<20) taken of a relatively flat surface. While the ICE mosaics did introduce some geometric distortion – the least distortion was found using the Planar Motion 2 stitching method – they produced few stitching errors and enabled researchers to quickly export high resolution for further investigation.

The high-resolution image mosaics were next exported as 16-bit TIFF files to ensure the maximum bit-depth for subsequent colour decorrelation using the DStretch plugin for ImageJ (Version 1.48). DStretch, written by Jon Harman and based on algorithms developed by NASA JPL (Harman 2008), has been successfully applied to faded pictographs (Brady, Gunn 2012; Harman 2014; Defrasne 2014). Recently DStretch has been used to enhance faded frescoes in Angkor Wat, the inspiration for the present application (Tan et al. 2014). The decorrelation algorithm, which has been described in mathematical detail elsewhere (Alley 1996), dramatically enhances the contrast between even very faded colours in an alternate colour-space and then renders the decorrelated colours in RGB using false colourization.

It should be noted that DStretch cannot be used to restore original colours – detailed chemical analysis of the pigments would be required for this purpose – but can be used to identify shapes otherwise too faded to trace with the naked eye. It should also be noted that the first technicoloured results from DStretch, while impressive, can be confusing for the untrained viewer. In Photoshop CS5 masking was used to remove extraneous false-colour enhancements outside the area of interest, and selective colour adjustment used to further enhance the contrast in critical areas for publication-ready images.

Two faded panels on the interior west wall of St. Petka's, which had not been restored by conservators, showed great initial promise by translating the images into the novel colour-spaces developed by Jon Harman as an alternative to RGB and LAB – YRD and YRE – a task which is easily accomplished in the DStretch plug-in (Harman 2008): 1) the panel to the south of the main entrance (fig. 9a), and 2) the panel above the main entrance (fig. 10a). Both had been identified after careful visual inspection in previous field seasons as the Archangel Michael and the Dormition of Mary respectively, but DStretch both confirmed these identifications photographically and produced high-contrast images from which detailed drawings could later be produced. The figure of Michael is clearly visible in the centre as is his right wing, though the top of his left wing has been lost to damage (fig. 9b); his halo and garments are now much better defined. The Virgin Mary is clearly visible supine in the centre of the fresco panel, as are the outlines of the figures attending her (fig. 10b).

4. Data integration

4.1. Colour decorrelation and photogrammetry

In order to integrate colour decorrelation with the 3D geometry of photogrammetry data it was first necessary to generate a high-quality mesh and then a high-quality texture (151 mega-pixels in PNG format) for the west wall. Because of the relatively simple geometry of the wall no remeshing (fixing of holes, spikes etc.) was necessary (fig. 11a). Because the .OBJ format stores the unwrapped texture in a separate image file, the whole texture file could be opened in ImageJ, a free and open-source image processing package, where DStretch filters were applied to the entire west wall with the same procedure as described in section 3.3. The colour-decorrelated texture was then opened in Photoshop CS5 where masking was used to isolate only the two areas of interest for colour decorrelation. A second copy of the unfiltered texture was then applied to fill the area that was masked out in the previous step. This new texture file that incorporated the two colour decorrelated



Fig. 5.
Photogrammetry in progress on the west wall (photo Nikolai Zlatanov)

areas was then substituted for the original texture file of the .OBJ and rendered in 3DS Max (fig. 11b).

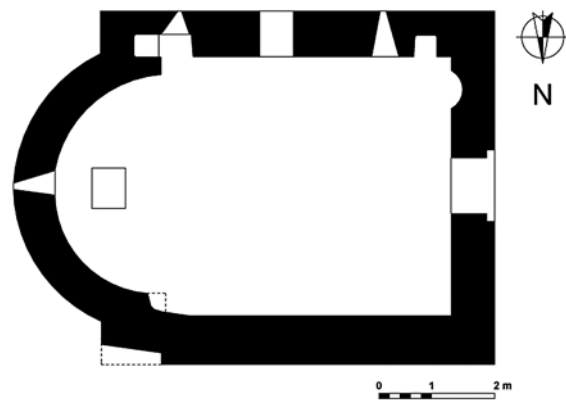
This technique is relatively straightforward as it requires no alignment of the texture with the model as this has already been handled with very high accuracy within the photogrammetry software. The only deficiency the authors note is that to build a model of this size using 16-bit TIFF files as source images, the format best suited to colour decorrelation, was almost impossible due to demands on RAM and processing time in Photoscan. At present only high-quality JPEGs were used to build the model and the texture on which colour decorrelation was performed.

4.2. RTI and photogrammetry

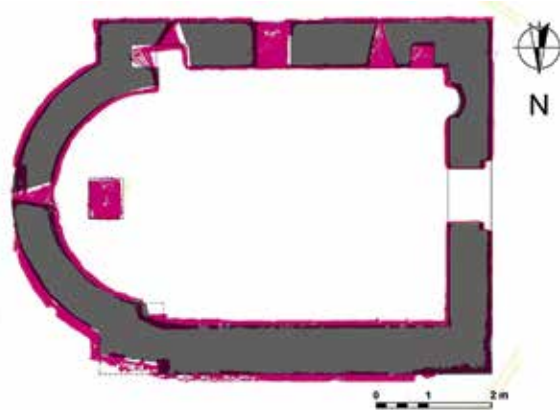
Previous attempts have been made to use the normals derived from RTI to complement the accurate geometry from laser range-scanning (Barbosa et al. 2008), but here proposed is a robust workflow for combining RTI with photogrammetry. The integration of surface normals from RTI into the rendering of selected areas of the 3D model was a less trivial process than the integration of colour decorrelation. The most significant problem was presented by the fact that the RTI imagery was collected at a different scale with a different lens than the photogrammetry imagery. Because of this difference of scale it was not possible to match the constituent RTI photos to the photos used for photogrammetry in Photoscan. Instead, a high-resolution textured .OBJ files of the west end of the exterior north wall (67 mega-pixels) were exported from Photoscan and imported into ImageJ. The texture was then cropped to roughly the area of the spolia block. One of the photographs of the spolia block used to build the RTI (fig. 4a) was also imported into ImageJ. The SIFT



Fig. 6.
Medium density, coloured point cloud of the St. Petka Church

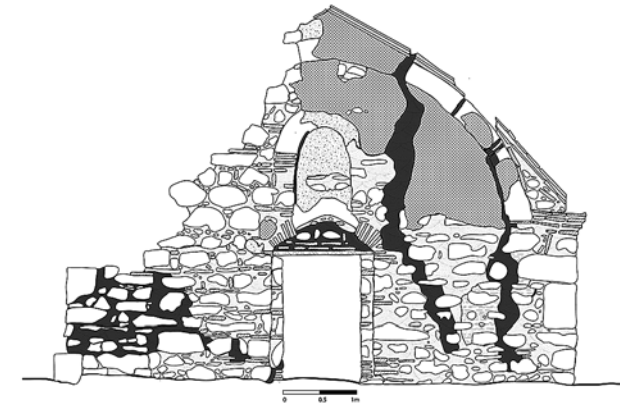


a



b

Fig. 7:
a – Top plan drawn from hand measurements;
b – Cross section in magenta from the point cloud superimposed on the plan



a



b

Fig. 8:
a – West façade drawn from hand measurements;
b – Line drawing of the west façade of St. Petka's (red) superimposed on the point cloud

Feature Extraction plug-in for ImageJ was then used to find matching points between the two images (Saalfeld 2009).

These matching points were then used in bUnwarpJ (Version 2.6.1, 17 September 2014), an elastic image registration plug-in, to align the source RTI image to the target image, the texture. Elastic registration permits both the rescaling of the image during registration and effectively compensates for the distortion in the RTI image file when it is registered against the photogrammetrically undistorted texture. The transform calculated by bUnwarpJ, represented as B-splines, is saved and then applied to the Surface Normal Visualization for the same RTI, which had been exported from the RTIViewer software (Version 1.1). Registration of Surface Normals to the texture directly is impossible as the two images are so different that SIFT cannot find matching points.

Once the normals have been registered on the texture and then combined in Photoshop with the rest of the unwrapped texture, the texture was loaded into the 3DS Max material editor and replaced the original .OBJ texture. The normals are then used to render the surface using the Phong Shader model to closely approximate Specular Enhancement in the RTIViewer. Comparison of the rendered model with normals derived from the photogrammetry model alone (fig. 12a) and with the normals derived from RTI (fig. 12b) show a great increase in detail comparable to the rendering of the normals in RTIViewer (fig. 4b).



Fig. 9:
a – Archangel Michael from St. Petka's, west wall, unenhanced;
b – Archangel Michael after colour decorrelation enhancement

5. Conclusion

The present project has demonstrated that three different computational photographic techniques, each of which is relatively low cost and portable, can be integrated to record the St. Petka Church and produce a single 3D product that matches or exceeds previous manual recording techniques. What is more, this recording could be done in less than two weeks with volunteers who had relatively little or no training in technical photography or more advanced techniques.

The authors do not mean to suggest that manual recording and close visual inspection are made redundant, but only that, for a modest investment of time and effort, photogrammetry, RTI and colour decorrelation can yield complementary results of lasting value. The final 3D product can be used as a baseline for future conservation and restoration work, and permits investigators to precisely place features revealed by RTI and colour decorrelation within a geo-referenced 3D model with millimetric accuracy. As a consequence, this data will provide a strong scientific foundation for any multi-disciplinary, graphic reconstruction of the St. Petka Church and will constrain the hypothetical scope of this venture (Raykovska 2014).

Much work remains yet to be done to integrate these three photographic modalities smoothly. First, the very accurate camera orientation data from photogrammetry could be used to align RTI data to the model automatically but this is not yet possible with the current software. Second, at present the computational power of personal computers is



a



b

Fig. 10.
a – The Dormition of the Virgin Mary from St. Petka's, west wall, unenhanced;
b – The Dormition of the Virgin Mary after colour decorrelation enhancement



a



b

Fig. 11.
a – 3D model of the west interior wall of St. Petka's rendered in 3DS Max;
b – Rendered 3D model of the west interior wall with colour decorrelation applied



a



b

Fig. 12.
a – Rendered 3D model of the spolia inscription with a Phong Shader applied on the normals derived from the photogrammetry data;
b – Rendered 3D model of the spolia inscription with a Phong Shader applied on the RTI/HSR no-rmal

still not great enough to support very detailed meshed-models with texture of the same resolution as captured by a 36 mega-pixel camera. It is only a matter of time, however, before the hardware catches up with the potential of the software, and full graphic reconstructions of larger buildings using all of these techniques simultaneously are possible.

6. Acknowledgments

The authors would like to thank the students who participated in the two one-week workshops on Advanced Digital Imaging in May and June of 2014. In particular, the authors would like to thank Laura Downing, Christina Malone, Anthony van Poppel who collected much of the photogrammetry data used in the present paper and who worked tirelessly to produce the initial results in the field. The authors would also like to thank Nikolai Zlatanov, the project assistant, who also took photos of the work in progress. George Bevan would like to thank the Queen's Senate Advisory Research Council and the Social Sciences and Humanities Research Council of Canada for providing funding for software and equipment. Miglena Raykovska would finally like to thank the donor to BHF who made possible her participation in the workshop.

References

Василева 1972

Василева Д. Шест средновековни църкви в района на София // МПК 4. 1972. С. 17–19.

Миятев 1939

Миятев К. Старинни църкви в Западна България // ИБАИ 1939. Т. XIII. С. 228–235.

Поборникова 1994

Поборникова Р. Нови археологически изследвания на три средновековни църкви от Софийск // Сердика-Средец-София 1994. Т. 2. С. 117–126.

3DS Max Autodesk 2014

3DS Max Autodesk. 2014. Available: <http://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview>. Accessed 28 November 2014.

Alley 1996

Alley R.E. Algorithm Theoretical Basis Document for Decorrelation Stretch, Version 2.2, NASA Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California. 1996. Available: http://eosps.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/atbd/ASTER_ATBD_99-2010.pdf. Accessed 28 November 2014.

Baptista 2013

Baptista M. Documenting a complex modern heritage building using multi image close range photogrammetry and 3d laser scanned point clouds. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W2, XXIV International CIPA Symposium. Strasbourg, 2013. Pp. 678–678.

Barbosa et al. 2008

Barbosa J., Bernardes P., Almeida M., Gomes P., Gonçalves R., Proença A. A technology cocktail for a 3D photo-realistic model of a I century Roman fountain: range scanning, RTI and physically based rendering. Proceedings of the 9th International conference on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage // VAST. 2008. Pp. 25–32.

Bevan et al. 2013

Bevan G.A., Lehoux D., Talbert R. Reflectance transformation imaging of a Byzantine portable sundial. Zeitschrift für Papyrologie und Epigraphik 187. 2013. Pp. 221–229.

Birch 2006

Birch J.S. Using 3DM analyst mine mapping suite for underground mapping. Proceedings of Laser and Photogrammetric Methods for Rock Tunnel Characterization Workshop. 42nd US Rock Mechanics Symposium ARMA. San Francisco, 2006. Pp. 13–32.

Brady, Gunn 2012

Brady L.M., Gunn R.G. Digital enhancement of deteriorated and superimposed pigment art: methods and case studies / J. McDonald, P. Veth (eds.). A Companion to Rock Art. Chichester: John Wiley & Sons, 2012. Pp. 625–643.

bUnwarpJ 2013

bUnwarpJ. Ignacio Arganda-Carreras. 2013. Available: <http://biocomp.cnb.csic.es/~iarganda/bUnwarpJ/>. Accessed 28 November 2014.
See also: Arganda-Carreras I., Sorzano C., Marabini R., Carazo J., Solorzano C.O., Kybic J. Consistent and elastic registration of histological sections using vector-spline regularization. Lecture notes in computer science. Computer Vision Approaches to Medical Image Analysis Vol. 4241/2006. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. Pp. 85–95.

Dall'Asta, Roncella 2014

Dall'Asta E., Roncella R. A comparison of semiglobal and local dense matching algorithms for surface reconstruction. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2014. Vol. XL-5. Pp. 187–194.

Defrasne 2014

Defrasne, C. Digital image enhancement for recording rupestrian engravings: applications to an alpine rockshelter // Journal of Archaeological Science 50. 2014. Pp. 31–38.

De Reu et al. 2013

De Reu J., Plets G., Verhoeven G., De Smedt P., Bats M., Cherretté B., De Clercq W. Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage // Journal of Archaeological Science 40(2). 2013. Pp. 1108–1121.

Doneus et al. 2011

Doneus M., Verhoeven G., Fera M., Briese C., Kucera M., Neubauer W. From deposit to point cloud: a study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations // XXIIIrd International CIPA Symposium 2011. Vol. 6. Pp. 81–88.

Earl et al. 2010

Earl G., Martinez K., Malzbender T. Archaeological applications of polynomial texture mapping: analysis, conservation and representation // Journal of Archaeological Science 37(8). 2010. Pp. 2040–2050.

Feature Extraction SIFT/MOPS 2009

Feature Extraction SIFT/MOPS. Stephan Saalfeld. 2009. Available: http://fiji.sc/wiki/index.php/Feature_Extraction. Accessed 28 November 2014.

Gabov, Bevan 2011

Gabov A., Bevan G. Recording the weathering of outdoor stone monuments using Reflectance Transformation Imaging (RTI): the case of the Guild of All Arts (Scarborough, Ontario) // Journal of the Canadian Association for Conservation 36. 2011. Pp. 3–14.

Giuliano 2014

Giuliano M.G. Cultural heritage: an example of graphical documentation with automated photogrammetric systems // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2014. Vol. XL-5. Pp. 251–255.

Harman 2008

Harman J. Using Decorrelation Stretch to Enhance Rock Art Images. 2008. Available: <http://www.dstretch.com/AlgorithmDescription.html>. Accessed 28 November 2014.

Harman 2014

Harman J. A Tale of Two Cañadas: the most northerly great mural site yet discovered. Society for California Archaeology Proceedings 2014. Vol. 28. Pp. 206–218.

Harrower et al. 2014

Harrower M.J., O'Meara K.M., Basile J.J., Hickman C.J., Swerida J.L., Dumitru I.A., Fieldhouse E. If a picture is worth a thousand words... 3D modelling of a Bronze Age tower in Oman // World Archaeology 46(1). 2014. Pp. 43–62.

ImageJ 2014

ImageJ. Version 1.48. 2014. Available: <http://imagej.nih.gov/ij>. Accessed 28 November 2014.

Koutsoudis et al. 2014

Koutsoudis A., Vidmar B., Ioannakis G., Arnaoutoglou F., Pavlidis G., Chamzas C. Multi-image 3D reconstruction data evaluation // Journal of Cultural Heritage 15(1). 2014. Pp. 73–79.

MacDonald, Robson 2010

MacDonald L., Robson S. Polynomial texture mapping and 3D representations. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVIII, Part 5. 2010. Pp. 422–427.

Malzbender et al. 2001

Malzbender T., Gelb D., Wolters H. Polynomial texture maps. Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. 2001. Pp. 519–528.

Manfredi et al. 2013

Manfredi M., Williamson G., Kronkright D., Doehne E., Jacobs M., Marengo E., Bearman G. Measuring changes in cultural heritage objects with Reflectance Transformation Imaging. Digital Heritage International Congress (Digital Heritage). IEEE Marseille, 2013. Vol. 1. Pp. 189–192.

Manfredi et al. 2014

Manfredi M., Bearman G., Williamson G., Kronkright D., Doehne E., Jacobs M., Marengo E. A new quantitative method for the non-invasive documentation of morphological damage in paintings using RTI surface normals // Sensors 14(7). 2014. Pp. 12271–12284.

Martínez et al. 2013

Martínez S., Ortiz J., Gil M.L., Rego M.T. Recording complex structures using close range photogrammetry: The Cathedral of Santiago de Compostela // The Photogrammetric Record 28(144). 2013. Pp. 375–395.

Matthews, Noble 2008

Matthews N., Noble T. Aerial and Close-range Photogrammetric Technology: Providing Resource Documentation, Interpretation and Preservation. Bureau of Land Management. Technical Note 428. 2008. Available: <http://www.blm.gov/nstc/library/pdf/TN428.pdf>. Accessed 6 November 2014.

Microsoft Image Composite Editor 2008

Microsoft Image Composite Editor. 2008. Available: <http://research.microsoft.com/en-us/um/redmond/groups/ivm/ICE>. Accessed 6 November 2014.

Mudge et al. 2006

Mudge M., Malzbender T., Schroer C., Lum M. New Reflection Transformation Imaging Methods for Rock Art and Multiple-Viewpoint Display // VAST. 2006. Vol. 6. Pp. 195–202.

PhotoScan, Agisoft 2014

PhotoScan, Agisoft. 2014. Available: <http://www.agisoft.ru>. Version 1.0.4. Accessed 6 November 2014.

Raykovska 2014

Raykovska M. The role of graphic reconstructions in the study and preservation of the immovable cultural heritage. Bulgarian e-Journal of Archaeology. Supplement 3. 2014. Pp. 93–103. Available: http://be-ja.org/supplementa/3-2014/Be-JA_2014_SUPP3-93-103.pdf. Accessed 6 November 2014.

Remondino 2011

Remondino F. Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning // Remote Sensing 3(6). 2011. Pp. 1104–1138. Available: <http://www.mdpi.com/2072-4292/3/6/1104>. Accessed 6 November 2014.

Remondino, Rizzi 2010

Remondino F., Rizzi A. Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites – techniques, problems, and examples // Applied Geomatics 2(3). 2010. Pp. 85–100.

Remondino et al. 2014

Remondino F., Spera M. G., Nocerino E., Menna F., Nex F. State of the art in high density image matching // The Photogrammetric Record 29(146). 2014. Pp. 144–166.

RTIBuilder, Cultural Heritage Imaging 2014

RTIBuilder, Cultural Heritage Imaging. 2014. Available: http://culturalheritageimaging.org/What_We_Offer/Downloads/Process. Version 2.0.2. Accessed 6 November 2014.

RTIBuilder, Cultural Heritage Imaging 2014a

RTIBuilder, Cultural Heritage Imaging. 2014. Available: http://culturalheritageimaging.org/What_We_Offer/Downloads/View. Version 1.1. Accessed 6 November 2014.

Spring, Peters 2014

Spring A. P., Peters C. Developing a low cost 3D imaging solution for inscribed stone surface analysis // Journal of Archaeological Science 53. 2014. Pp. 97–107.

Tan et al. 2014

Tan N.H., Sokrithy I., Than H., Chan K. The hidden paintings of Angkor Wat // Antiquity 88(340). 2014. Pp. 549–565.

Zaccagnino et al. 2012

Zaccagnino C., Bevan G., Gabov A. The Missorium of Ardabur Aspar: new considerations on its archaeological and historical contexts // Archeologia classica 63. 2012. Pp. 419–454.

L. Kühne
BLfD / LMU, Germany

J.W.E. Faßbinder
R. Linck
F. Becker
BLfD, Germany

ROMAN COUNTRYSIDE OF NORTHWESTERN NORICUM AND THE DISCOVERY OF A NEW ROMAN VILLAE

The process of Romanization of the countryside in the Roman province of Noricum appears to have progressed much earlier and slower than in the other northwestern provinces. Recent work has focused on geophysical prospection and is now giving us a much greater understanding of the density and continuity of occupation of the Roman countryside. Earlier excavations, surface collection and aerial photography only gave an incoherent slight impression on this research topic. The geophysical surveys of the project “Roman *villae rusticae* in Bavarian part of ancient Noricum” show many significant results that give us an idea of how the countryside of this area in Roman times appeared to be. The results from the 2013/14 field seasons suggest that our knowledge of this archaeological landscape increased to a level of understanding, with the integration of remote sensing (fig. 1).

Geophysical prospection in Bad Endorf

The GPR depth slices show the remains of four buildings from a Roman villa rustica between 0.35 and 1.3 m depth. The site has a typical layout for north-western Noricum with two residential buildings (fig. 2). The first building has the layout of a typical risalit villa with two floor-heated rooms in the front and a huge yard; the second one is bigger and rectangular, but poorly preserved. We know this setting in villa architecture from examples in Austria, like in Glas (Traxler, Kastler 2010). Beside that we discovered two side buildings and several mural structures belonging to the courtyard.

3D analysis of GPR data

Through the interpretation of all depth slices separately we gain much more information from the GPR prospection. We can confirm the height of the preserved walls in the ground; we understand which floor is preserved below or above hypocaust cellars and we are able to interpret different renovation phases. Through a virtual 3D analysis the long parallel mural structures in the area between the two residential buildings could be interpreted as a terraced courtyard, which is placed at the most steep slope in the modern landscape.

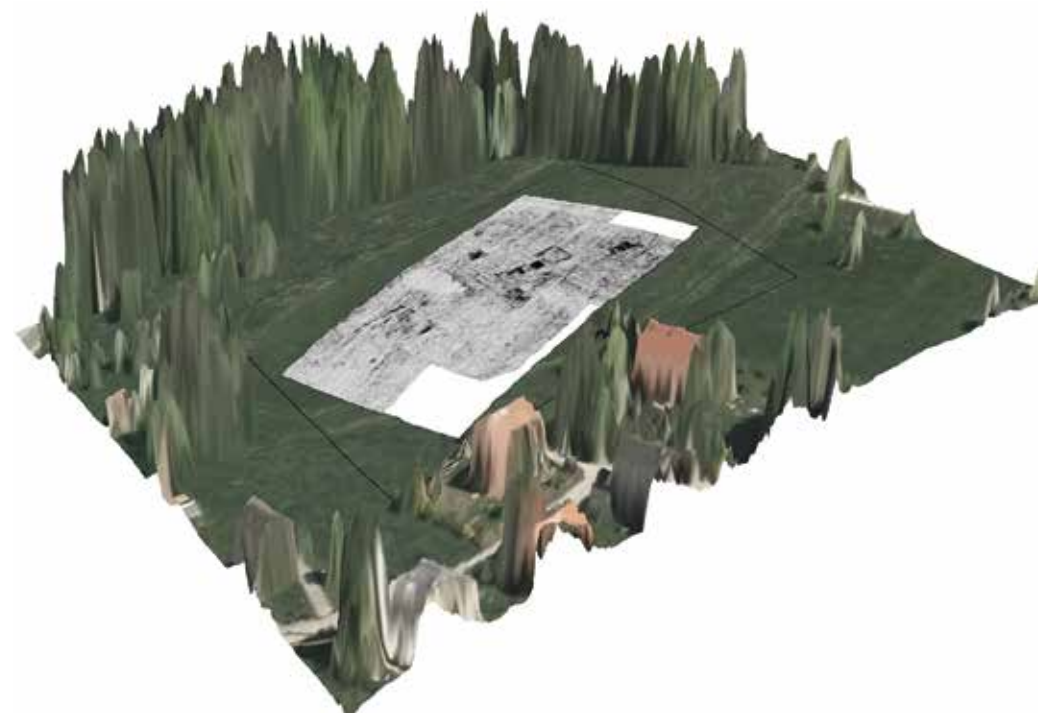


Fig. 1.
Bad Endorf. Radargram depth slice 40–60 cm, GSSI SIR-3000 with 400 MHz-antenna, prospected area 109 × 80 m sampling interval 2 × 25 cm (BLfD, Archiv-Nr. 8138/102) overlaid with Lidar data (© Bayerische Vermessungsverwaltung)

Lidar analysis

Aside from the documentation of the villas themselves with geophysical prospection, an approach to landscape archaeology is made by analysing two large areas with Lidar data. From the first area we know the locations of some Roman villas, so we could analyse the site selection and try to identify the adjacent territory and traces of field systems. Knowledge of suitable conditions for the presence of archaeological sites gained from the prospection and analysis of the first area will hopefully enable the detection of new archaeological sites in the second area, if conditions for their existence are favourable, even though presently no Roman villas are known.

Through the geophysical results, Lidar-Data-Analysis and other research we could get a much more differentiated view of the composition and organisation in the Roman countryside. By such an integrated data analysis, including the indications about the roads, street stations, cemeteries, sanctuaries and environmental data, enables us to create an approximate virtual reconstruction of the landscape and environment of Roman villas in Roman Noricum.

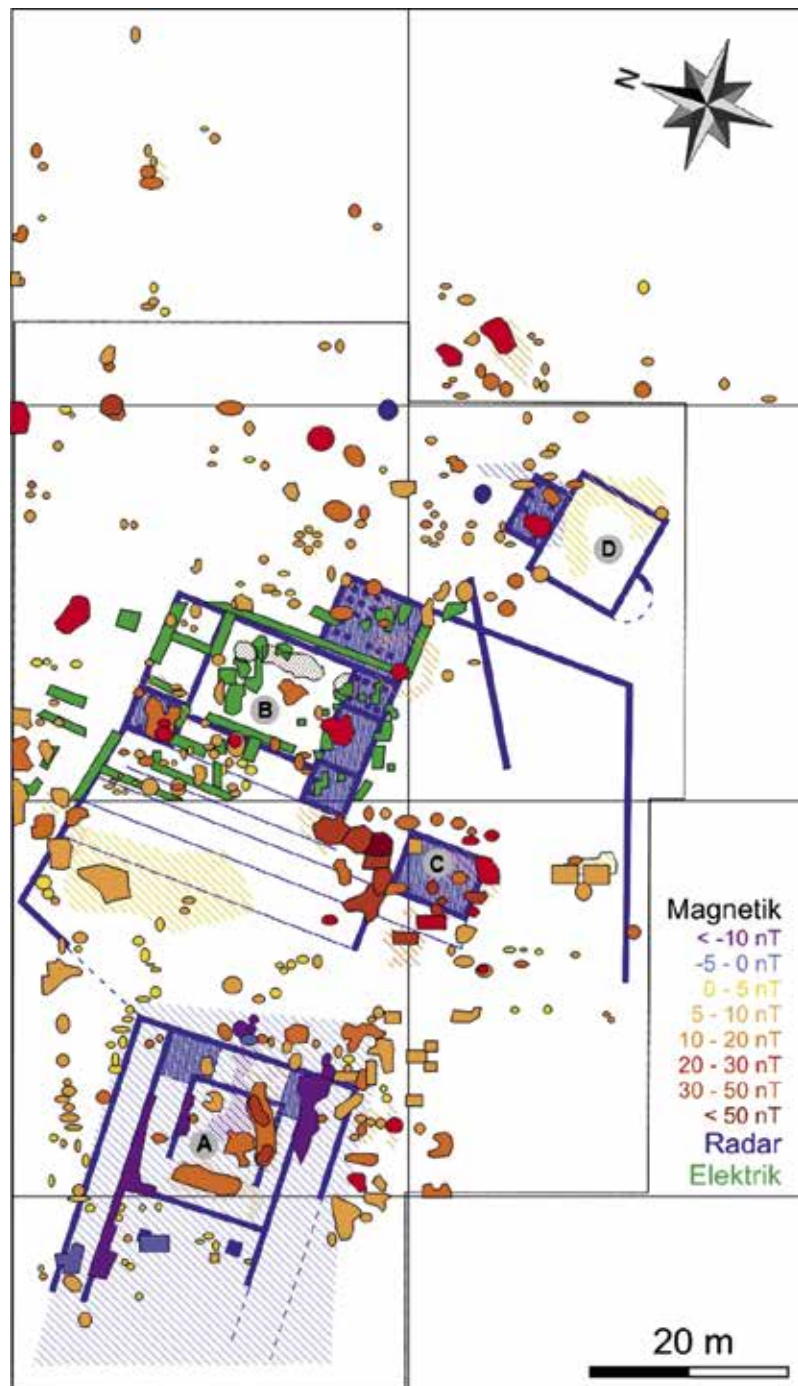


Fig. 2.
Interpretation from the magnetic and GRP prospection in Bad Endorf.
(L. Kühne, R. Linck, BLfD, Plan Nr. 8138/102)

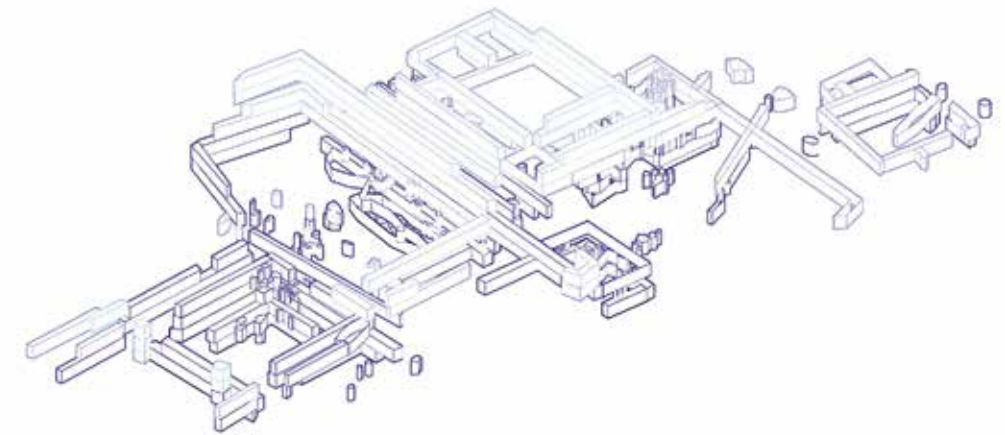


Fig. 3.
Virtual 3D interpretation from the GRP prospection in Bad Endorf.
(L. Kühne, BLfD, AutoCAD-Plan Nr. 8138/102)

References

Czysz et al. 1995

Czysz W., Dietz K., Fischer T., Kellner H.-J. Die Römer in Bayern. Stuttgart: Theiss Verlag, 1995.

Fischer 1994

Fischer T. Römische Landwirtschaft in Bayern / H. Bender, H. Wolff (Hrsg.). Ländliche Besiedlung und Landwirtschaft in den Rhein – Donau – Provinzen des Römischen Reiches. Espelkamp, 1994. Bd. 2. Pp. 267–300.

Kühne 2014

Kühne L. Römische Villen im bayerischen Noricum. Verwendung naturwissenschaftlicher Prospektionsmethoden zur Erschließung forschungsgeschichtlich problematischer Befunde. COLLOQUIUM IUUVAVUM 2012, Archäologie in Salzburg. Bd. 8, Jahresschrift des Salzburg Museum Bd. 56, Das municipium Claudium Iuvavum und sein Umland, Bestandsaufnahme und Forschungsstrategien, 2014. Pp. 203–213.

Traxler; Kastler 2010

Traxler S., Kastler R. Römische Guts- und Bauernhöfe in Nordwest-Noricum. Gehöftsstrukturen, Wohn- und Badegebäude / K. Schmotz et al. (Hrsg.). Fines Transire, Jahrgang 19, Archäologische Arbeitsgemeinschaft Ostbayern/West- und Südböhmen/Oberösterreich. Rahden, 2010. Pp. 233–252.

S.K.T.S. Wärmländer
Stockholm University, Sweden

S. B. Sholts
Smithsonian Institution, USA

S. Schlager
University of Freiburg, Germany

CONVENTIONAL AND ELLIPTIC FOURIER TRANSFORMS AS MATHEMATICAL TOOLS FOR MORPHOLOGICAL CLASSIFICATION

Introduction

Many questions in biology are focused on morphology, the study of form. In order to describe and understand structural variation among organisms, researchers have employed a variety of methods to quantify phenotypic traits and features. Some traditional methods, such as linear distance measurement, are widely used for simple descriptions of size and shape. However, as the biological sciences have become more interdisciplinary and new technologies more accessible, the morphometric toolkit has expanded accordingly (Bookstein 1991; Richtsmeier et al. 2002; Zelditch et al. 2012). Morphological studies now routinely employ methods of quantitative shape description that originated in other disciplines and in some cases for wholly different purposes. Although certain biological applications of these methods may have proven successful, their comparative benefits or disadvantages are not always clear (Sholts et al. 2011a).

Fourier analysis has been increasingly used in morphological studies in recent decades (Bookstein et al. 1982; Erlich et al. 1983; Read, Lestrel 1986). Developed by Jean Baptiste Joseph Fourier in the early 19th century, the Fourier transform has important uses in e.g. acoustics, optics, quantum mechanics, and electrical engineering. The curve-fitting procedure known as Fourier analysis (also known as harmonic or spectral analysis) describes shapes as the sums of simpler trigonometric functions, consisting of a series of Fourier coefficients. In the late 20th century, biologists and physical anthropologists started using Fourier descriptors to describe and compare outlines in organismal forms, including many aspects of mammalian cranial morphology (Lestrel 2000; 2008).

We have previously shown (Sholts et al. 2011b) that adult male crania can be accurately classified into geographical groups via statistical analysis of midfacial contours, obtained by digitally sectioning the midface of cranial 3D models (Figures 1 and 2). In that study, the midfacial contours were analyzed with elliptic Fourier analysis (Kuhl, Giardina 1982), producing Fourier coefficients that were used to develop linear discriminant functions, which were able to correctly classify 86% of the examined crania into one of the three sample

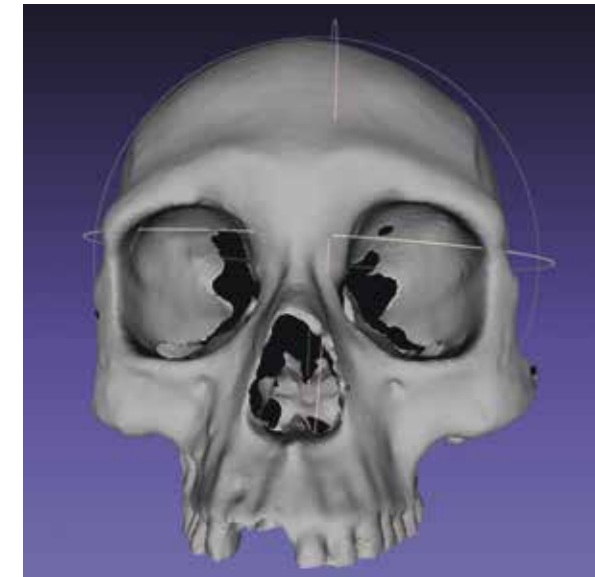


Fig. 1.
Digital 3D surface model of one of the studied human crania, recorded with a NextEngine tabletop laser scanner.

groups (Chinese, Norwegian, or California Indian). The advantages of outline data over linear distance measurements were demonstrated not only by increased accuracy across more than two groups (Gill et al. 1988), but also through the high repeatability and low potential for observer errors in the process of defining the midfacial contour (Sholts et al. 2011b). Thus, the study showed that midfacial contours contain shape information useful for differentiating crania of various geographic origins, and that this shape information can be successfully captured by elliptic Fourier analysis.

In addition to elliptic Fourier analysis, a range of other mathematical approaches can be used to analyze line shapes such as contours. One such approach is the conventional Fourier transform (Sholts, Wärmländer 2012), which unlike the elliptic Fourier transform cannot describe complex outlines. In this work, we use this transform to extract shape information from midfacial contours of the previously studied sample of Chinese, Norwegian, and California Indian crania. By comparing these results with those obtained by elliptic Fourier analysis, we are able to evaluate the pros and cons of these two mathematical approaches for craniometric outline analysis.

Materials

The 90 adult male crania used in the study derive from archaeological excavations in Norway, China, and the United States. Age and sex determinations were made according to the standards for data collection from human skeletal remains (Buikstra, Ubelaker 1994). The Norwegian crania (n=30) were excavated from the medieval parish graveyards of the St. Hallvard and St. Nicolaus churches in Oslo and are housed at the Anatomical Institute of the University of Oslo, Norway. The Chinese crania (n=30) were excavated from Ming Dynasty tombs in the Yunnan province of Southern China and are housed at the Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology (IVPP) in Beijing, China. The Native Californian crania (n=30) were excavated from several prehistoric cemeteries on Santa Rosa

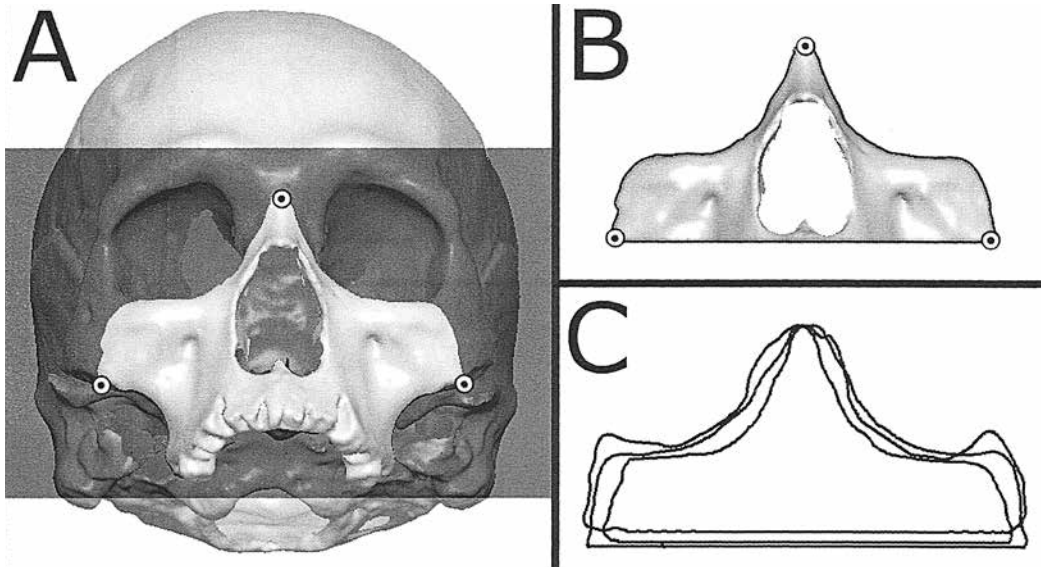


Fig. 2.
The procedure for obtaining midfacial contours from a cranial 3D model.
A) The landmarks *nasion* and right and left *zygomaxillae* are identified and used to define a geometric plane, which isolates the anterior midfacial skeleton.
B) A second plane removes the portion below *zygomaxillae*.
C) The silhouette of the remaining midfacial portion yields the closed contour used for comparisons.

Island off the Southern California coast (site numbers SRI-2, -3, and -41) and are housed at the Santa Barbara Natural History Museum in California, USA (see Shearer et al. 2012).

Methods

3D model analysis

Digital surface models of the crania (fig. 1) were created with a NextEngine desktop 3D laser scanner, using a previously described protocol of 16 scans per cranium (Sholts et al. 2010). Scan data were captured at a resolution of 150 dots per inch, and models were rendered with mesh triangles 0.11 cm in size. Each model was imported into the RapidWorks software version 2.3.4, and midfacial contours of the kind shown in Fig. 2 were created using our previously described method (Sholts et al. 2011b). Since conventional Fourier analysis cannot be performed on contours containing incurvature, i.e. when two points on the contour have the same x-value, the midfacial outlines were truncated on both sides. Thus, the contours were cut off at the points of local y-value maxima as shown in Fig. 3.

Conventional Fourier analysis

To correct size differences among the crania, all contours were scaled to unity along the x-axis, i.e. the distance between points A and B in Fig. 3 was set to 1. In order to maintain the proportions of the outlines, the y-axis data were scaled by the same amount. Each outline was then sampled with 100 equally spaced points, whose y-values were calculated as the means of the points of the original contour in each of the x-axis intervals, i.e. $x = 0.00-0.01$;

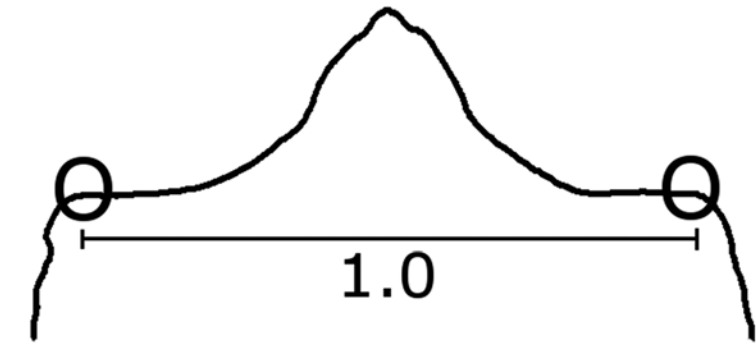


Fig. 3.
In order to provide outlines suitable for conventional Fourier analysis, the recorded contours were truncated at specific points (circled) and then scaled to uniform length, yielding uniform x-axis distances of 1.0.

0.01-0.02; 0.02-0.03 and so on. These sets of equidistant points were Fourier-transformed according to equation 1, using standard MATLAB software:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^k a_n \cos(n) + \sum_{n=1}^k b_n \sin(n) \quad (\text{Eq. 1})$$

where n is the harmonic number and k is the maximum harmonic number, given by the number of data points (=100). In order to reduce the number of coefficients and to discard the phase information which arguably is less informative in this kind of study, the absolute values for this series, $abs(f_n)$, were calculated from the (a_n, b_n) coefficient pairs according to the standard equation 2:

$$abs(f_n) = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

In line with the specifications of the Nyquist theorem, half the resulting Fourier coefficients, i.e. 50 for each specimen, were used for further statistical analysis.

Elliptic Fourier transformation

The closed midfacial contours were subjected to elliptic Fourier analysis using the protocol by Kuhl and Giardina (Kuhl, Giardina 1982), where each closed two-dimensional curve $f(t)$ is represented by two conventional Fourier series, one for $x(t)$ and one for $y(t)$, according to equations 3 and 4.

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^k a_n \cos(t) + \sum_{n=1}^k b_n \sin(t) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\text{and } y(t) = C_0 + \sum_{n=1}^k c_n \cos(t) + \sum_{n=1}^k d_n \sin(t) \quad (\text{Eq. 4})$$

These two equations yield four Fourier coefficients for each harmonic number, i.e. one each for x-sin, x-cos, y-sin, and y-cos.

Statistical analysis

Multiple Discriminant Analysis (MDA) was employed to create discriminant functions that could separate crania into their respective affinity groups. Using the STATA 10 software, iterative refinement was used to find sets of discriminant functions that showed high discriminatory power but were based on as few Fourier coefficients as possible. The performances of different discriminant functions were evaluated with the leave-one-out method, where each cranium was independently classified according to discriminant functions based on the Fourier coefficients of the other 89 crania in the sample.

In order to quantify the asymmetry of the contours, the coefficient sums of the asymmetric sine (b_n) and the symmetric cosine series (a_n) from the conventional Fourier transforms were calculated, and the ratios of these sums (i.e. $\sum b_n / (\sum a_n + \sum b_n)$) were obtained for each specimen.

Results

The amplitude values of the 50 coefficients per specimen obtained with conventional Fourier analysis were used as independent variables for multivariate discriminant analysis. Iterative refinement resulted in an optimal set of discriminant functions based on the 9 select coefficients of order 1, 4, 6, 8, 16, 25, 30, 43, and 47. These discriminant functions were able to successfully classify 72% of the crania, i.e. 24/30 (80%) of the Chinese crania, 23/30 (77%) of the Norwegian crania, and 18/30 (60%) of the Native Californian crania (Table 1).

The average proportion of asymmetric (sine) coefficients were found to be around 19 % for all three populations, which is unexpectedly similar (data are presented in Table 2).

Discussion

Our results indicate that the discriminant functions based on conventional Fourier coefficients do not separate the three groups as well as those based on elliptic Fourier coefficients, which in our previous study (Sholts et al. 2011b) yielded an overall correct classification of 86%, i.e. 26/30 (87%) for the Norwegians, 25/30 (83%) for the Californians, and 26/30 (87%) for the Chinese (Table 1). These results indicate that conventional Fourier analysis does not capture the shape information in the outlines as efficiently as elliptic Fourier analysis. However, the results may also reflect a loss of diagnostic shape information when the midfacial outlines were truncated in order to remove incurvature. Further research is required to investigate this possible effect.

On the other hand, we found that coefficients obtained with the conventional Fourier transform were simpler to interpret with respect to morphological variation. In particular, since the traditional transform decomposes a contour into symmetric cosine and asymmetric sine waves, a quantitative measure of the outline symmetry was easily obtained from the ratio of the coefficient sums for the sine and cosine series. For the present

	Elliptic Fourier analysis		Conventional Fourier analysis	
	# correct	% correct	# correct	% correct
Norway	26	87	23	77
California	25	83	18	60
China	26	87	24	80
	26	86	22	72

Table 1.

Number and percentage of correct classifications by linear discriminant functions based on Fourier coefficients obtained with either elliptical or conventional Fourier analysis. Mean values in bold.

	Proportion of asymmetric coefficients		
	range	mean	SD
Norway	8% – 42%	18.8%	7.6
California	9% – 34%	19.0%	7.4
China	7% – 38%	18.8%	7.2
		18.9%	

Table 2.

Proportions of asymmetric Fourier coefficients for the three populations under study, obtained with conventional Fourier analysis.

sample, these ratios turned out to be 18.8 ± 7.2 % for the Chinese group, 18.8 ± 7.6 for the Norwegian crania, and 19.0 ± 7.4 for the Native Californians (Table 2). Thus, even though there is considerable variation within each group, i.e. asymmetry ratios are observed in the range 7 – 38% for the Chinese crania, 8 – 42% for the Norwegians, and 9 – 34% for the Native Californians, the mean values for the different population groups are remarkably similar. Previous studies have demonstrated the utility of human craniofacial asymmetry as an indicator of various environmental factors such as biomechanical stress and poor nutrition (Vig, Hewitt 1975; Bishara et al. 1994; Pirttiniemi 1998; DeLeon 2007). Even though no firm conclusions can be drawn from these preliminary results, it is clear that biologically relevant symmetry information is conveniently provided by conventional Fourier transforms. In addition, the conventional Fourier transform is a standard operation in most statistics and mathematics software, wherefore such analysis can be carried out without specialized computer programs.

Conclusions

In this study, conventional and elliptic Fourier transforms were applied to outlines of human midfacial skeletal morphology from three different geographical groups in order to compare the discriminant power of Fourier coefficients obtained with the two techniques. Even though both kinds of analysis are able to obtain shape information for an entire

multi-component region of the human cranium without the measurement of many separate landmarks or distances, the preliminary results suggest that elliptic Fourier analysis more effectively extracts the shape information than conventional Fourier analysis.

Because both elliptic and traditional transforms analyze the overall shape of a contour, the biological interpretation of variation in Fourier coefficients is difficult. Although the elliptic Fourier coefficients were more effective in this case study, both types of Fourier descriptors seem to have properties useful for the study of biological shapes. Conventional Fourier analysis is more easily interpretable in general, yielding a smaller number of independent, more meaningful variables for statistical analysis. Furthermore, conventional Fourier analysis has the advantages of not requiring specialized software, as well as producing coefficients that contain more easily accessible symmetry information. As bilateral asymmetry can be a valuable source of information about genetic and environmental factors of morphological variation, resulting in numerous methods to measure and differentiate asymmetry among organisms (Charnov 1993), we believe that using Fourier analysis to quantify and compare asymmetry is particularly useful in morphometric studies. In our future research we will continue to explore other applications of Fourier analysis for identifying patterns of morphological variation in the human skeleton.

References

Bishara et al. 1994

Bishara S.E., Burkey P.S., Kharouf J.G. 1994. Dental and facial asymmetries: a review // *The Angle Orthodontist* 64(2). 1994. Pp. 89–98.

Bookstein 1991

Bookstein F.L. Morphometric Tools for Landmark Data: Geometry and Biology. New York : Cambridge University Press, 1991.

Bookstein et al. 1982

Bookstein F.L., Strauss R.E., Humphries J.M., Chernoff R.L., Elder R.L., Smith G.R. A comment upon the uses of Fourier methods in systematics // *Systematic Zoology* 31(1). 1982. Pp. 85–92.

Buikstra, Ubelaker 1994

Buikstra J.E., Ubelaker D.H. (eds.). Standards for data collection from human skeletal remains: Proceedings of a seminar at the Field Museum of Natural History. Arkansas Archeological Report Research Series 44. 1994.

Charnov 1993

Charnov E.L. Life History Invariants: Some Explorations of Symmetry in Evolutionary Ecology. Oxford : Oxford University Press, 1993.

DeLeon 2007

DeLeon V.B. Fluctuating asymmetry and stress in a Medieval Nubian population // *American Journal of Physical Anthropology* 132. 2007. Pp. 520–534.

Erlich et al. 1983

Erlich R., Pharr R.B. Jr., Healy-Williams N. Comments on the validity of Fourier descriptors in systematics: A reply to Bookstein et al. // *Systematic Zoology* 32(2). 1983. Pp. 202–206.

Gill et al. 1988

Gill G.W., Hughes S.S., Bennett S.M., Gilbert B.M. Racial identification from the midfacial skeleton with special reference to American Indians and Whites // *Journal of Forensic Sciences* 33(1). 1988. Pp. 92–99.

Kuhl, Giardina 1982

Kuhl F.P., Giardina C.R. Elliptic Fourier features of a closed contour. *Computer Graphics Image Processing* 18. 1982. Pp. 236–258.

Lestrel 2000

Lestrel P.E. Morphometrics for the Life Sciences. Singapore : World Scientific, 2000.

Lestrel 2008

Lestrel P.E. (ed.). Fourier Descriptors and their Applications in Biology. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

Pirttiniemi 1998

Pirttiniemi P. Normal and increased functional asymmetries in the craniofacial area // *Acta Odontologica Scandinavica* 56(6). 1998. Pp. 342–345.

Read, Lestrel 1986

Read D.W., Lestrel P.E. Comment on uses of homologous-point measures in systematics: A reply to Bookstein et al. // *Systematic Zoology* 35(2). 1986. Pp. 241–253.

Richtsmeier et al. 2002

Richtsmeier J.T., DeLeon V.B., Lele S.R. The promise of geometric morphometrics // *Yearbook of Physical Anthropology* 45. 2002. Pp. 63–91.

Shearer et al. 2012

Shearer B.M., Sholts S.B., Garvin H.M., Wärmländer S.K.T.S. Sexual dimorphism in human browridge volume measured from 3D models of dry crania: A new digital morphometrics approach // *Forensic Science International* 222. 2012. Pp. 400.e1–400.e5.

Sholts et al. 2010

Sholts S.B., Wärmländer S., Flores L., Miller K., Walker P.L. Variation in the measurement of cranial volume and surface area using 3D laser scanning technology // *Journal of Forensic Sciences* 55(4). 2010. Pp. 871–876.

Sholts et al. 2011a

Sholts S., Flores L., Walker P.L., Wärmländer S.K.T.S. Comparison of coordinate measurement precision of different landmark types on human crania using a 3D laser scanner and a 3D digitiser: Implications for applications of digital morphometrics // *International Journal of Osteoarchaeology* 21. 2011. Pp. 535–543.

Sholts et al. 2011b

Sholts S., Walker P.L., Kuzminsky S., Miller K., Wärmländer S.K.T.S. Identification of group affinity from cross-sectional contours of the human midfacial skeleton using digital morphometrics and 3D laser scanning technology // *Journal of Forensic Sciences* 56. 2011. Pp. 333–338.

Sholts, Wärmländer 2012

Sholts S.B., Wärmländer S.K.T.S. Zygomaticomaxillary suture shape analyzed with digital morphometrics: Reassessing patterns of variation in American Indian and European populations // Forensic Science International 217. 2012. Pp. 234.e1–234.e6.

Vig, Hewitt 1975

Vig P.S., Hewitt A.B. Asymmetry of the human facial skeleton // The Angle Orthodontist 45(2). 1975. Pp. 125–129.

Zelditch et al. 2012

Zelditch M.L., Swiderski D.L., Sheets H.D. Geometric Morphometrics for Biologists: a Primer. San Diego : Academic Press, 2012.

А. С. Пахунов

Институт археологии РАН, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОУГЛОВОЙ ТЕНЕВОЙ
ФОТОСЪЁМКИ ДЛЯ ФИКСАЦИИ СОСТОЯНИЯ
СОХРАННОСТИ И СЛЕДОВ РЕСТАВРАЦИИ
ПАЛЕОЛИТИЧЕСКОЙ ЖИВОПИСИ
(НА ПРИМЕРЕ КАПОВОЙ ПЕЩЕРЫ)

1. Введение

Изучение Каповой пещеры началось в середине XVIII века (Рычков 1760). Рисунки были открыты в 1959 году (Рюмин 1961). В 1960 году начала работать археологическая экспедиция под руководством О. Н. Бадера, в составе которой были и реставраторы. Ими были расчищены от вандальных надписей рисунки на верхнем этаже пещеры (Бадер 1965. С. 16–18), а также раскрыто панно «Лошади и Знаки» на среднем этаже (Бадер 1977. С. 130; Бадер 1979. С. 157–158). После раскрытия рисунков в 1960–1970 годах и до конца 2000-х годов реставрационные работы не проводились. За это время с рисунками произошли значительные изменения – на некоторых рисунках на панно «Лошади и Знаки» образовались непрозрачные наслоения кальцита. Этим объясняется проведение в 2008 году на указанном панно пробных расчисток (Сергиеня, Черемисин 2008). Точные границы проведения реставрационных работ, а также подробное описание методики проведения раскрытий в отчётах не приводятся. Ввиду этого в настоящее время актуальными являются задачи по фиксации текущего состояния сохранности рисунков и происходящих в них изменений, а также выяснению, являются ли эти изменения следствием проведённых работ.

2. Постановка задачи

В зависимости от условий образования кальцит может формировать полупрозрачные и полностью непрозрачные слои, различающиеся размерами и ориентировкой кристаллов (Chalmin et al. 2008). Образование кристаллов связано с присутствием градиента содержания углекислого газа в поступающей инфильтрационной воде и в атмосфере пещеры (White 2007). В настоящее время залы с рисунками закрыты для туристов, поэтому основное влияние на них оказывает процесс минералообразования, а также микробиологическая активность. В Каповой пещере первые наблюдения за степенью увлажнённости стен, а также замеры микроклиматических показателей были выполнены не ранее середины 1980-х годов (Щелинский 1987. С. 16), в то же время неудовлетворительное состояние сохранности рисунков было отмечено комиссиями ИА АН СССР уже в 1980–1981 годах (Щелинский 1993. С. 59), и её ухудшение продолжилось (Щелинский 1996. С. 7).

К настоящему времени накоплен большой объём фотодокументации наскальных рисунков, что позволяет проводить сравнительный анализ их состояния сохранности



Рис. 1.
Ортофотоснимок рисунка «Мамонт-диссидент» (фото А. С. Пахунова).

на макроуровне. В то же время использование традиционной фотографии для фиксации изменений, происходящих в течение непродолжительных периодов (от нескольких месяцев до года), требует сохранения неизменным положения камеры и источника освещения, что не всегда возможно и безопасно (Saiz-Jimenez et al. 2011). Для решения задачи мониторинга предпочтительнее использовать методы фиксации, не зависящие от положения камеры и позволяющие работать с абсолютными координатами точек поверхности, например, фотограмметрию и 3D-сканирование. Вместе с тем пространственное разрешение 3D-моделей, получаемых с использованием метода фотограмметрии, недостаточно для фиксации микроизменений на поверхности рисунков, а использование 3D-сканеров ограничивается высокой влажностью и высокой стоимостью оборудования.

Альтернативным методом получения информации о микрорельефе поверхности является многоугловая теневая фотосъемка (МТФ), позволяющая получать изображения в формате RGBN, т. е. двумерные изображения, содержащие помимо информации о цветовых характеристиках (RGB) также и описание отражательных свойств поверхности (N) (Mudge et al. 2012). Использование данного метода позволяет фиксировать

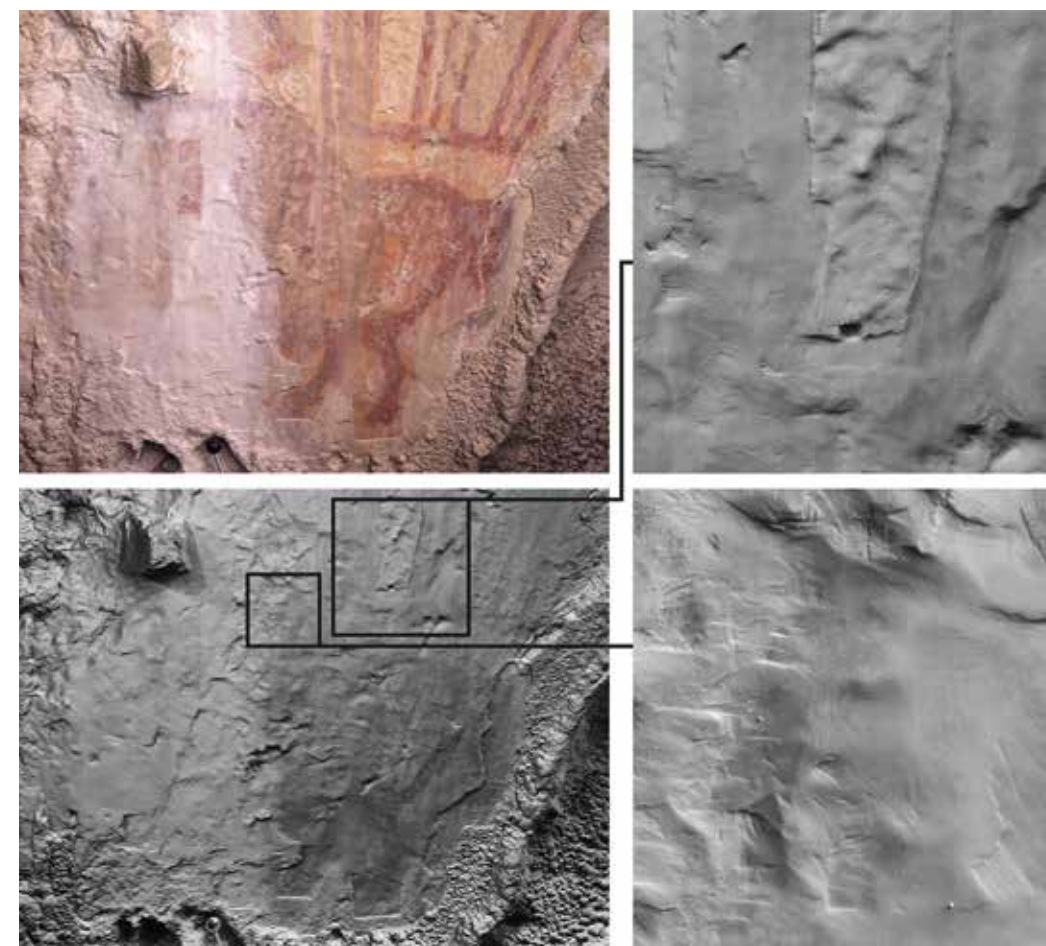


Рис. 2. 2.1 – Фотография рисунка «Нижняя лошадь» в видимом свете; 2.2 – Карта нормалей поверхности; 2.3, 2.4 – Фрагменты карты нормалей 2.2 (фото А. С. Пахунова).



Рис. 3. 3.1 – Карта нормалей фрагмента рис. 2.1; 3.2 – Фотография видимой люминесценции этого же фрагмента (фото А. С. Пахунова).

дефекты размером менее 100 мкм при использовании фотокамеры с матрицей 36Мп (Mudge et al. 2006. P. 200; Manfredi et al. 2014. P. 12279). Таким образом, использование МТФ как средства мониторинга характеризуется оптимальным соотношением достигаемого разрешения и стоимости оборудования.

3. Методы и материалы

Для съёмки использовался фотоаппарат Nikon D800 с объективом Micro Nikkor 55/2.8. В качестве осветителя использовалась портативная вспышка Metz 50 AF-1 с ксеноновой лампой. Дистанция и ориентация вспышки определялись лазерным дальномером. Построение РТМ-файла проводилось в среднем по 50–70 кадрам. Для анализа микрорельефа поверхности наиболее информативным было использование карт нормалей, представленных в оттенках серого.

4. Результаты и обсуждение

Капова пещера имеет трёхэтажное строение. Залы с рисунками располагаются на среднем и верхнем этажах. Для залов характерны различные гидрологические и микроклиматические условия, определяющие разное состояние сохранности рисунков. На верхнем этаже, в Зале Рисунков, стены сухие, рисунки выполнены непосредственно по коренным породам и не закрыты наслоениями кальцита. Вандальные граффити удалялись с использованием лишь смоченных водой тампонов (Бадер 1965. С. 18). Состояние рисунков удовлетворительное (рис. 1).

В то же время рисунки в композиции «Лошади и Знаки» в Зале Хаоса на среднем этаже пещеры были полностью скрыты под слоем кальцита толщиной несколько сантиметров (рис. 2.1; 2.2). Работы по раскрытию проводились последовательно: сначала с помощью грубого инструмента (стамески двух размеров ~3 и 1,5 см) была удалена основная масса кальцита, после чего слой утончался с использованием скальпеля (Щелинский 2001). Для удаления верхнего слоя и крупных натёков на поверхности стены реставраторами использовалась стамеска шириной 3 см, а для более тонкой работы – шириной порядка 1,5 см, следы скальпеля на снимках достоверно не зафиксированы. После того как были удалены непрозрачные слои, у реставраторов появилась возможность увидеть контуры рисунка сквозь полупрозрачный слой кальцита с параллельно-шестоватой структурой. В том случае, когда контур рисунка мог быть прочитан до полного удаления верхних слоёв, их оставляли, расчищая лишь небольшое пространство за пределами рисунка (рис. 2.3). На некоторых участках, связанных с понижением или повышением рельефа, поверхность имела вид «ступеней» (рис. 2.4). Использование автоматической дрели (Baffier et al. 1998. P. 28) или пластикового инструмента (Brunet, Vidal 1987. P. 420) позволило бы получить более гладкие границы раскрытий.

Проведённые в 2008 году работы по пробному удалению микрогуровых структур, образованных мелкокристаллическим кальцитом и отсутствующих на снимках, выполненных не позднее 1989 года (Schelinski 1989. P. 617, fig. 2), показали, что к тому времени они сформировали плотный и трудноудаляемый слой (Сергиеня, Черемисин 2008. С. 7). Детальная съёмка расчищенных участков позволила зафиксировать не только границы новых расчисток, но также их относительную глубину (рис. 3.1), также на фотографиях видимой люминесценции эти расчистки стали отчётливо видны как более светлые области (рис. 3.2). В будущем это позволит проводить объективный контроль над процессом расчистки при производстве реставрационных работ, а также обнаруживать и устранять новые натёчные коры на начальных стадиях их образования.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 13-06-00277.

Литература

Бадер 1965

Бадер О. Н. Капова пещера. М. : Наука, 1965.

Бадер 1977

Бадер О. Н. Северная палеолитическая и Окская экспедиции // Археологические открытия 1976 года. М. : Наука, 1977. С. 130–131.

Бадер 1979

Бадер О. Н. Новые работы в пещере Шульган-Таш (Каповой) // Археологические открытия 1978 года. М. : Наука, 1979. С. 157–158.

Рычков П. И. 1760

Рычков П. И. Описание пещеры, находящейся в Оренбургской губернии при реке Белой, которая из всех пещер, в Башкирии находящихся, за славную и наибольшую почитается // Ежемесячные сочинения и переводы, к пользе и увеселению служащие. Март. СПб : Императорская Академия Наук, 1760. С. 195–220.

Рюмин 1961

Рюмин А. В. Пещерная живопись позднего палеолита на Южном Урале // Archelogicki rozhledy. Praha. 1961. Vol. 13 (5).

Сергиеня, Черемисин 2008

Сергиеня В. В., Черемисин Д. М. Отчет о реставрационно-исследовательских работах по палеолитическим рисункам пещеры Шульган-Таш (Капова пещера). М. : ФГУП Межобластное научно-реставрационное художественное управление, 2008.

Щелинский 1987

Щелинский В. Е. Некоторые итоги новых исследований пещеры Шульган-Таш (Каповой) на Южном Урале // Вопросы древней и средневековой истории Южного Урала. Уфа : БФАН СССР, 1987. С. 5–16.

Щелинский 1993

Щелинский В. Е. Состояние и перспективы сохранения живописи Каповой пещеры. Памятники наскального искусства. М.: Координационно-методический центр прикладной этнографии Института этнологии и антропологии РАН, 1993. С. 57–61.

Щелинский 1996

Щелинский В. Е. Некоторые итоги и задачи исследований пещеры Шульган-Таш (Каповой). Уфа : ИИЯЛ УНЦ РАН, 1996.

Щелинский 2001

Щелинский В. Е. Настенное искусство верхнепалеолитического святилища в пещере Шульган-Таш (Каповой) на Южном Урале: композиция «Лошади и знаки в зале Хаоса // Проблемы первобытной культуры. Уфа : Гилем, 2001. С. 33–53.

Baffier et al. 1998

Baffier D., Guillaumet E., Chillida J., Girard M., Hardy M., Brunet J. The Grand Grotte at Arcy-sur-Cure (Yonne, France) // New Discoveries by Thinning Calcite. International Newsletter on Rock Art. 1998. Vol. 21. Pp. 28–29.

Brunet, Vidal 1987

Brunet J., Vidal P. Interventions sur les œuvres pariétales préhistoriques: quelques exemples // *Pact*. 2008. Vol. 37 (4). Pp. 411–422.

Chalmin et al. 2008

Chalmin E., Sansot E., Oriol G., Bousta F., Reiche I. Microanalysis and synthesis of calcite. Growth mechanisms on prehistoric paintings in the Large Cave, Arcy-sur-Cure (Yonne, France) // *X-Ray Spectrometry*. 2008. Vol. 37 (4). Pp. 424–434.

Manfredi et al. 2014

Manfredi M., Bearman G., Williamson G., Kronkright D., Doehne E., Jacobs M., Marengo E. A New Quantitative Method for the Non-Invasive Documentation of Morphological Damage in Paintings Using RTI Surface Normals // *Sensors*. 2014. Vol. 14 (7). Pp. 12271–12284.

Mudge et al. 2006

Mudge M., Malzbender T., Schroer C., Lum M. New Reflection Transformation Imaging Methods for Rock Art and Multiple-Viewpoint Display // *VAST*. 2006. Vol. 6. Pp. 195–202.

Mudge et al. 2012

Mudge M., Schroer C., Noble T., Matthews N., Rusinkiewicz S., Toler-Franklin C. Robust and scientifically reliable rock art documentation from digital photographs // *A Companion to Rock Art*. Chichester: John Wiley & Sons, 2012.

Saiz-Jimenez et al 2011

Saiz-Jimenez C., Cuezva S., Jurado V., Fernandez-Cortes A., Porca E., Benavente D., Cañaveras J. C., Sanchez-Moral S. Paleolithic art in peril: policy and science collide at Altamira Cave // *Science*. 2011. Vol. 334 (6052). Pp. 42–43.

Schelinski 1989

Schelinski V. E. Nouvelles découvertes dans la grotte Kapovaia // *L'Anthropologie*. 1989. Vol. 93 (2). Pp. 615–622.

White 2007

White W. B. Cave sediments and paleoclimate // *Journal of Cave and Karst studies*. 2007. Vol. 69 (1). Pp. 76–93.

О. В. Зайцева, М. В. Вавулин, А. А. Пушкарёв, Е. В. Водясов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

ТРЕХМЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ И НАЗЕМНАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ: ВОЗМОЖНОСТИ 3D-ФИКСАЦИИ ПОГРЕБАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ IN SITU

1. Введение

В 2013–2014 годах в разнотипных погребальных комплексах Западной Сибири проводились полевые исследования с применением современных технологий 3D-фиксации и 3D-документирования процесса раскопок. Наиболее масштабные работы были проведены в археологическом комплексе Зелёный Яр в Ямало-Ненецком автономном округе и Тимирязевском археологическом комплексе в Томской области.

Целью проекта являлось параллельное применение двух технологий при полевой фиксации погребений – трёхмерного сканирования и наземной фотограмметрии с целью дальнейшего сравнительного анализа получаемых результатов. И на основе сканирования, и с помощью фотограмметрии были получены высокоточные фото-реалистичные трёхмерные модели погребений. При создании моделей комплексов с особо сложной геометрией была использована технология сканирования в комбинации с фотограмметрией для получения одной итоговой трёхмерной модели.

2. Методика сканирования погребений

В ходе исследования возможностей фиксации погребений в полевых условиях были применены три разные модели сканеров: Creaform VIUscan, Creaform GoScan3D и Artec Spider. Поскольку объекты исследования располагались в труднодоступных районах, все выбранные для работы сканеры удовлетворяли необходимым требованиям портативности и лёгкости. Все они предназначались для сканирования предметов в затемненном помещении, поэтому важной технической особенностью при работе в условиях полярного дня на могильнике Зелёный Яр была необходимость изготовления тента, полностью закрывающего погребение от прямого солнечного света.

Ручной оптический бесконтактный 3D-сканер Creaform VIUscan.

Процесс сканирования в полевых условиях выглядел следующим образом: на площади погребения размещались специальные позиционные точки, с помощью которых сканер ориентировался в пространстве. Параллельно с этим лазерный проектор, встроенный в сканер, проецировал на сканируемую поверхность две перпендикулярные линии. Эти линии считывались камерами сканера и в результате компьютерной обработки преобразовывались в поверхность. Все эти действия осуществлялись одновременно в режиме реального времени в программе Creaform VxElements 2.1, в которой производился визуальный контроль самого процесса сканирования и его первичная обработка. Далее полученные данные в виде триангуляционных сеток импортировались в программу Geomagic Design X, в которой выполнялось сшивание

данных сеток в единую поверхность и наложение текстур. На последнем этапе готовая модель погребения импортировалась в программу Autodesk 3DS Max 15, в которой создавались видео- и стереоролики.

Ручной оптический бесконтактный 3D-сканер Creaform GoScan3D.

В 2014 году при фиксации погребений был также опробован сканер Creaform GoScan3D, основным преимуществом которого является иная технология съёмки поверхности. В отличие от предыдущего сканера, где поверхность строилась двумя перпендикулярными линиями, GoScan позволяет снимать поверхность сразу по всей области захвата камер (380 × 380 мм), что значительно ускоряет процесс сканирования.

Процесс сканирования схож с предыдущей моделью: сканер ориентируется в пространстве по позиционным точкам, расположенным на объекте, но вместо лазерных линий на поверхность белым светом проектора наносится определенная матрица, которая также считывается через камеры. Недостаток данного сканера заключается в достаточно низком разрешении – 0,5 мм. При таком разрешении итоговой модели мелкие детали (менее 1,5 мм) не будут отображены. VIUscan позволяет захватывать детали размером не менее 0,6 мм, однако время, затраченное на сканирование, будет увеличено в 4–5 раз.

Ручной оптический бесконтактный 3D-сканер Artec Spider.

Попытка использования сканера Artec Spider в полевых условиях для фиксации погребений оказалась неудачной, поскольку при сканировании достаточно большой площади погребения вычислительных мощностей компьютера (ноутбук HP Elitebook 8460p, Intel core i5 2,6 GHz, 16Gb RAM, Radeon HD 6470M 1Gb) не хватило для обработки потока данных. Это привело к падению скорости съёмки до 1–0,5 кадров в секунду, недостаточной для работы в полевых условиях.

3. Применение фотограмметрии при фиксации погребений

Для создания трёхмерных моделей археологических объектов с помощью технологии фотограмметрии специального оборудования не требуется. Достаточно любой цифровой полупрофессиональной фотокамеры. Нами использовался цифровой фотоаппарат Nikon D700. Технология съёмки для обработки методом фотограмметрии значительно проще трёхмерного сканирования: производится фотосъёмка объекта со всех сторон и под разными углами. Фиксацию необходимо производить таким образом, чтобы зоны фотографирования на каждом последующем снимке перекрывались не менее чем на 70 %. В среднем для фиксации одного погребения необходимо сделать около 40–60 снимков. Обработка данных выполняется в фотограмметрическом программном пакете Agisoft PhotoScan. В программе происходит сопоставление полученных фотографий, выявляются общие точки, измеряются расстояния и углы между ними, далее с помощью специальных математических алгоритмов создаётся трёхмерная поверхность, и на неё накладывается текстура. На получаемой трёхмерной модели по опорным точкам задаётся масштаб, далее возможны любые дополнительные измерения, не снятые в поле.

4. Обсуждение результатов

Работы по 3D-фиксации в полевых условиях проводились для грунтовых и наземных погребений различной сохранности: от остатков костного тлена до частично мумифицированных мягких тканей. Обе технологии – сканирование и фотограмметрия – позволяют создавать высокоточные фотореалистичные трёхмерные модели исследуемых погребений.

Полученные с помощью сканеров модели имели следующее разрешение: для сканера Creaform VIUscan – 0,2 мм, для Creaform GoScan3D – 0,5 мм. Разрешение моделей, полученных с помощью фотограмметрии, – 3 мм, при этом оно было выбрано как оптимальное для создания общих планов. Технология фотограмметрии теоретически позволяет получать модели и с более высоким разрешением.

Несомненными преимуществами фотограмметрии при фиксации погребений на современном этапе развития технологии являются:

- отсутствие необходимости покупки дорогостоящего оборудования. Программное обеспечение для фотограмметрии стоит в несколько раз дешевле программного обеспечения для обработки данных сканирования (более того, существуют и бесплатные пакеты для обработки данных фотограмметрии, например, Autodesk 123D Catch);
- более оперативная и простая фиксация.

В случае строгого соблюдения всех необходимых условий фотограмметрической фиксации: калибровки и корректных настроек камеры, правильного выбора сценария съёмки (положение и ориентировка камеры, шаг фиксации и т. д.) возможно получение моделей столь же высокого разрешения, как и при сканировании.

В некоторых случаях целесообразно использовать комбинированный способ фиксации, например, в погребениях очень сложной геометрической формы, с необходимостью сканирования деталей одновременно на разных высотных уровнях. В случае с погребением в лодке конструктивные детали разной сохранности находились на разных уровнях, и сканирование всей поверхности было затруднено. Некоторые места практически недоступны для работы со сканером. Поэтому для фиксации общего плана была применена технология фотограмметрии, а наиболее важные мелкие детали, которые располагались на дне погребения, были отсканированы в высоком разрешении. Далее все модели были приведены в единую систему координат, и в результате получена одна, отображающая в целом всю сложную форму погребения, с более детальными важными элементами.

Как говорилось выше, работы велись в наземных и грунтовых погребениях. Понятно, что в случае захоронений в подбоях и катакомбах необходимо применение иной методики. В этих случаях оптимальным вариантом 3D-фиксации будет являться сканирование, так как для фотограмметрии потребуется создание внутри погребений искусственного освещения, а сам сценарий съёмки будет весьма затруднительным.

5. Заключение

Поскольку фотограмметрический метод не требует никаких серьёзных материальных затрат и достаточно прост в освоении, можно ожидать переход к 3D-фиксации и визуализации результатов археологических раскопок именно на основе этой технологии. Использование фотограмметрии позволит значительно повысить оперативность и точность существующей практики археологической фиксации.

Все модели погребений, сделанные в ходе проекта, доступны на сайте artefact.tsu.ru.

6. Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта «Человек в меняющемся мире. Проблемы идентичности и социальной адаптации в истории и современности» (грант Правительства РФ П 220 № 14.В.25.31.0009).

РЕКОНСТРУКЦИИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ В ВИРТУАЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

RECONSTRUCTIONS AND VISUALIZATION IN VIRTUAL SPACE

Д. А. Карелин

Московский архитектурный институт (Государственная академия), Россия

РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЗДНЕРИМСКИХ КРЕПОСТЕЙ В ЕГИПТЕ: ПРИМЕРЫ, ПРОБЛЕМЫ И ОСОБЕННОСТИ

Введение

Основной целью исследования является создание реконструкций нескольких памятников позднеримской архитектуры в Египте, чьи архитектурные черты наиболее наглядны или наоборот специфичны. В данной статье представлены некоторые примеры.

Компьютерные реконструкции могут служить нескольким задачам в историко-архитектурной науке. Во-первых, они необходимы для иллюстрации результатов архитектурных и археологических исследований. Во-вторых, они служат инструментом верификации принятых решений в процессе создания реконструкций памятников и их изучения.

В современной российской историографии распространена точка зрения о новизне виртуальных реконструкций: в западной науке они получили распространение с 90-х годов XX века, а в российской – лишь с начала XXI века (Румянцев и др. 2011. С. 62–63; Жеребятьев 2013. С. 3–8). Это верно лишь отчасти. Несмотря на то что новые компьютерные технологии в настоящий момент уже внесли существенные изменения в методологию археологии (Hookk 2013; Гук 2014), для создания виртуальных 3D-реконструкций компьютер является всего лишь инструментом воплощения (правда, дающим уникальные возможности). Методика же, базирующаяся на принципах историко-архитектурного анализа, была создана задолго до распространения компьютерных технологий. На протяжении всего XX века активно практиковалось создание научных реконструкций в ручной графике. Методика научной аргументации реконструкций практически не отличается в зависимости от инструмента исполнения. В качестве примеров можно привести великолепные акварельные реконструкции Ж.-К. Голвена (Charron et al. 2011) и блестящие линейные реконструкции Ш. Гибсон (A catalogue... 1991), которыми иллюстрировано немало книг по археологии и истории архитектуры 1960-х годов. В МАРХИ в середине XX века было открыто научное и образовательное направление по созданию реконструкций памятников архитектуры, первоначально в виде макетов, в настоящее время – в виде цифровых реконструкций (Клименко, Клименко 2011). Кроме того, в российской реставрационной практике все проекты сопровождаются реконструкциями (в настоящее время в основном цифровыми), но результаты, к сожалению, крайне редко публикуются.

В исследовании представлены трёхмерные реконструкции исследуемых крепостей и на их примере рассмотрены архитектурные особенности позднеримской военной архитектуры в Египте, памятники которой лучше сохранились, обладали более

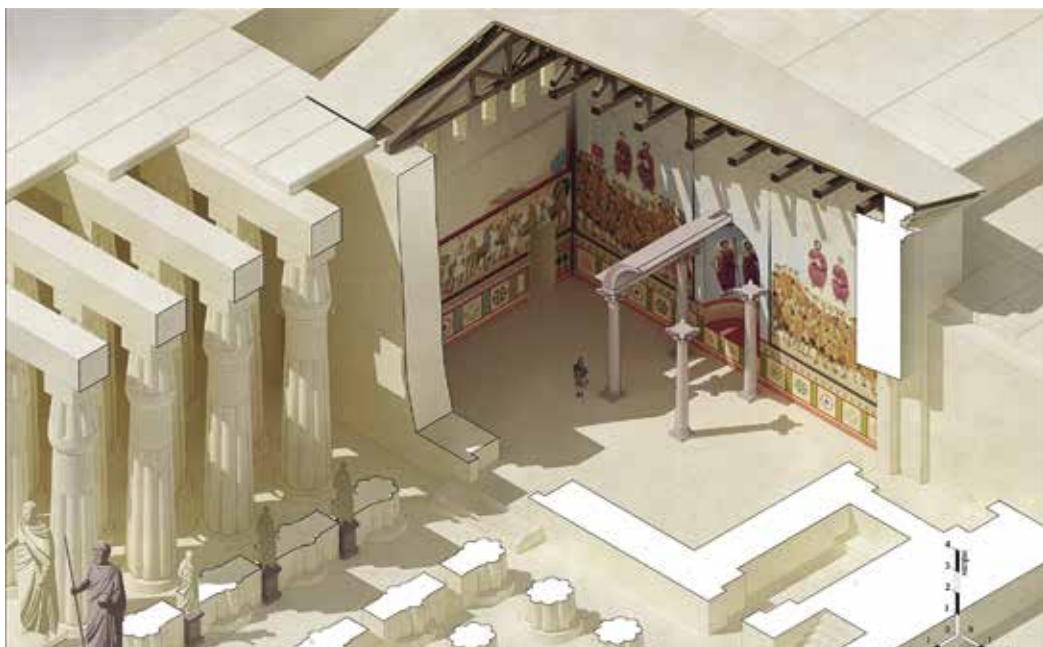


Рис. 1.
Аксометрия храма культа римского императора в Луксоре (Реконструкция автора. Моделирование, рендер и постобработка автора и М. А. Карелиной)
Рис. 2.
Интерьер храма культа римского императора в Луксоре (Реконструкция автора. Визуализация автора и М. А. Карелиной)

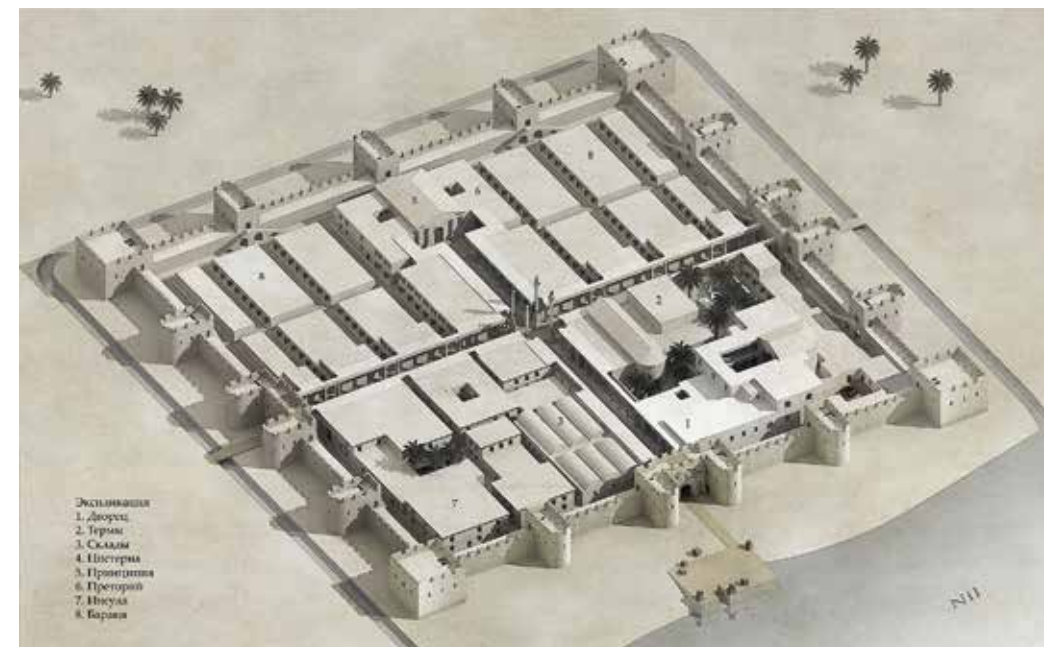


Рис. 3.
Аксометрия крепости в Наг эль-Хагар (реконструкция автора)

разнообразной типологией и сложными архитектурными чертами, в отличие от ранних фортификационных сооружений (Карелин 2011b. С. 16). Работа основывается на трёх авторских реконструкциях: храма культа римского императора в Луксоре (Карелин 2014, Karelin 2015) и позднееримских крепостей в Наг эль-Хагаре (Карелин 2011a) и Дионисиасе (Карелин и др. 2015).

Храм культа римского императора в Луксоре

Храм культа римского императора находился внутри крепости, построенной вокруг древнего храма в Луксоре, и представлял собой образец храма этого культа в диоклетиановской *principia*. Последняя, несмотря на использование римлянами для её создания пространств древнеегипетского храма, имела все планировочные элементы и черты, присущие *principia* рубежа III и IV веков: двор, базилику, капеллу и ряд вспомогательных помещений (El-Saghir et al. 1986. P. 25, 31), а также монументальные входы во двор и из двора в базилику (Карелин 2014. С. 6–7). Однако этот памятник показывает исключительный пример соединения черт древнеегипетской и римской культур в *principia* с храмом культа римского императора. В современной историографии существует немало гипотез, предполагающих тесную связь между культом римского императора и культом фараона, который, предположительно, отправлялся в первом вестибюле древнеегипетского храма (Bell 1985). Наиболее подробно историография вопроса изложена в книге Д. Клотца (Klotz 2012. P. 376–379). Представляется, что такие изменения архитектурных черт древнего храма, как установка перед колоннами гипостильного зала статуй тетрархов, а также ряд других перестроек, внесённых



Рис. 4.
Аксонометрия дворца в крепости в Наг эль-Хагар (реконструкция автора)

римлянами в планировку древнего храма, свидетельствуют, с одной стороны, о возможном использовании некоторых более ранних храмов культа римского императора на Ближнем Востоке в качестве прототипов для храма этого культа в Луксоре, а с другой – о следовании архитекторами храма ряду принципов древнеегипетской архитектуры (Karelin 2015).

Крепость в Наг эль-Хагар

Крепость в Наг эль-Хагар находилась южнее Луксора, рядом с Ком Омбо. Вероятно, это фортификационное сооружение было построено во времена правления Диоклетиана. Она была исследована несколькими археологическими экспедициями (см., например: Wareth, Zignani 1992; Mackensen 2006; Mackensen 2009; Franke 2013). Сохранившиеся следы показывают, что эта крепость, наряду с фортификационными сооружениями в Луксоре и Вавилоне, являлась образцом позднеимперской крепости для полевой армии в Египте. Однако её архитектура имела как минимум две уникальные черты. Во-первых, внутри сохранились следы позднеантичного дворца, предназначенного для *дукса* или *презида* провинции Фиваида или даже для императора Диоклетиана во время его пребывания в Египте. Особенности архитектуры этого дворца роднят его с типичным для поздней античности типом богатого жилища с двумя апсидальными залами – для приёма клиентов и парадной столовой для титулованных гостей (Карелин 2011а. С. 13–16). Во-вторых, результаты последних исследований археологов (не отражённые в моей реконструкции, выполненной в 2011 году) показали, что крепость имела крайне необычную *principia* с восьмиугольной в плане капеллой

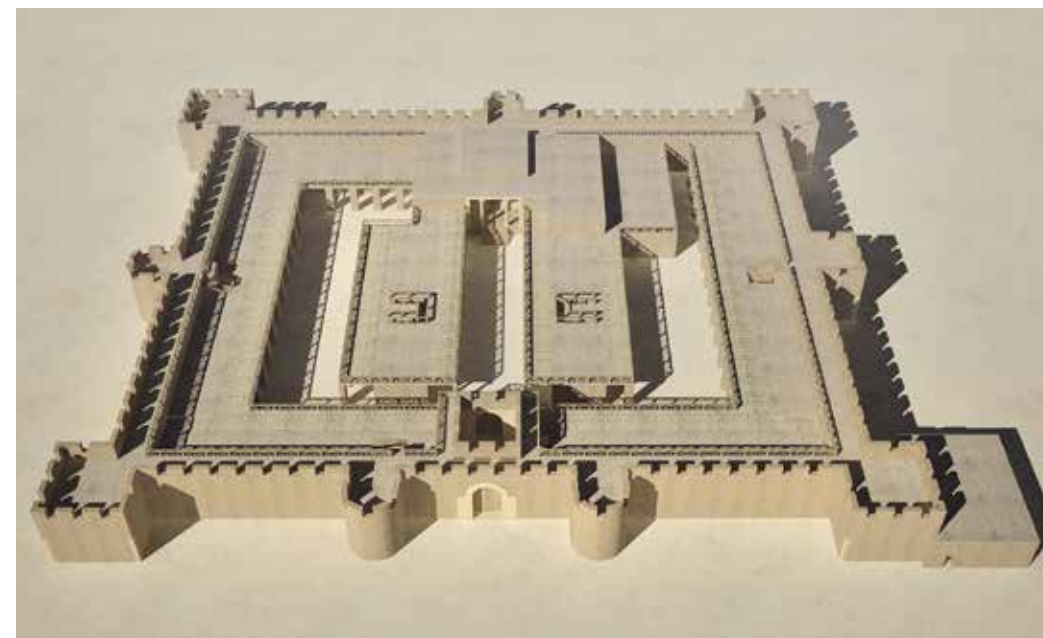


Рис. 5.
Аксонометрия римской крепости в Дионисиасе (реконструкция Д. А. Карелина, Т. И. Житпелевой, М. А. Карелиной; визуализация М. А. Карелиной)

Рис. 6.
Principia и *via praetoria* крепости в Дионисиасе. Вид от ворот (реконструкция Д. А. Карелина, Т. И. Житпелевой, М. А. Карелиной; визуализация М. А. Карелиной)

(Franke 2013). Ни автор, ни археологи, нашедшие эту *principia*, не знают примеров восьмиугольных в плане капелл (Franke 2013. Р. 461), однако архитектурные параллели можно найти среди императорских дворцов, вилл, мавзолеев и общественных зданий.

Крепость в Дионисиасе

Крепость в Дионисиасе была расположена рядом с крупным городом на пересечении торговых путей в оазисе Фаюм. Вероятно, она также была основана при Диоклетиане. Крепость была подробно исследована в конце 1940-х годов франко-швейцарской экспедицией (Qasr-Qārūn 1969). Это фортификационное сооружение представляет в плане прямоугольник, длина которого приблизительно равна 83 м, а ширина – 70 м. В северной стене располагались единственные ворота, от которых на юг до *principia* с капеллой шла обрамлённая колоннадами *via praetoria*. *Principia* представляла собой особенный тип подобного сооружения в маленькой крепости с урезанным набором помещений, без главного двора и полноценной базилики, но с заменяющей их обрамлённой колоннадами улицей перед капеллой (Карелин и др. 2015. С. 9–16, рис. 7–8). Справа от *via praetoria* у южной стены располагался *praetorium*. Угловые башни и одна из башен вдоль стен были квадратными в плане, остальные, включая фланкирующие ворота, были подковообразными. Изнутри к стенам были пристроены разные помещения, преимущественно казармы.

Заключение

Представляется, что выполненные реконструкции позволили показать, как могли выглядеть исследуемые крепости и поспособствовали изучению архитектурных черт позднеантичного военного зодчества римлян. Планируется продолжить работу в нескольких направлениях. Во-первых, предполагается создание реконструкций в рамках изучения позднеимператорских крепостей в Египте на примере какой-либо небольшой крепости IV–V веков из оазиса Харга и крепостей для полевой армии (например, лагеря в Луксоре и крепости Вавилон). Во-вторых, ведётся работа по изучению архитектурных элементов, присущих изучаемым памятникам, сопровождающаяся поиском максимального количества возможных аналогий. Результатом данной работы должен стать своеобразный «словарь» архитектурных элементов и планировочных решений для изучения римских крепостей в Египте. Наконец, систематизация архитектурных особенностей позднеантичных крепостей в Египте предполагает отдельное обобщающее исследование.

Благодарности

Данная статья является частью проекта РГНФ 14-34-01215 «Особенности архитектуры позднеимператорских крепостей в Египте», в то время как исследование античной ордерной архитектуры некоторых памятников (дворца в Наг эль-Хагар и храмов культа римского императора в Луксоре и Дионисиасе) реализуется в рамках проекта РНФ 14-18-01601 «Прошлое и будущее классической архитектуры» в Московском архитектурном институте (Государственной академии).

Литература

Гук 2014

Гук Д. Ю. Исторические реконструкции: от идеи к виртуальному воплощению // Труды IV (XX) всероссийского археологического съезда в Казани. Казань : Институт археологии АН РТ, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт археологии РАН, Институт археологии и этнографии СО РАН, 2014. Т. 4. С. 294–295.

Жеребятёв 2013

Жеребятёв Ю. И. Методы исторической реконструкции памятников истории и культуры России средствами трёхмерного компьютерного моделирования: автореф. дис. ... канд. ист. наук. М. : МГУ, 2013.

Карелин 2011a

Карелин Д. А. Визуализация позднеимператорской крепости. Гипотетическая компьютерная реконструкция крепости Наг эль-Хагар в Египте = Karelin D. A. Imaging of the Late Roman Castrum. Hypothetical Computer Reconstruction of Nag el-Hagar Fortress in Egypt [Электронный ресурс] // Architecture and Modern Information Technologies. 2011. Vol. 2 (15). URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2011/2kvart11/karelin/abstract.php> (дата обращения: 22.02.2015).

Карелин 2011b

Карелин Д. А. Римское крепостное зодчество в Египте // Вопросы истории фортификации. СПб., М., 2011. 2. С. 4–26.

Карелин 2014

Карелин Д. А. Визуализация позднеимператорской крепости – 2. Компьютерная реконструкция храма культа римского императора в позднеимператорской крепости в Луксоре (Египет) [Электронный ресурс] // Architecture and Modern Information Technologies. 2014. Vol. 1 (26). URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2014/1kvart14/karelin/abstract.php> (дата обращения: 22.02.2015).

Карелин и др. 2015

Карелин Д. А., Житпелева Т. А., Карелина М. А. Визуализация позднеимператорской крепости – 3. Реконструкция позднеимператорской крепости в Дионисиасе (Египет) // Architecture and Modern Information Technologies. 2015. 1 (30). URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2015/1kvart15/karelin/abstract.php> (дата обращения: 22.02.2015).

Клименко, Клименко 2011

Клименко С. В., Клименко Ю. Г. Макетирование при создании научных реконструкций памятников русской архитектуры [Электронный ресурс] // Architecture and Modern Information Technologies. 2011. Vol. 4 (17). URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2011/4kvart11/klimenko/abstract.php> (дата обращения: 22.02.2015).

Румянцев и др. 2011

Румянцев М. В., Смолин А. А., Барышев Р. А., Рудов И. Н., Пиков Н. О. Виртуальная реконструкция объектов историко-культурного наследия // Прикладная информатика. 2011. № 6(36). С. 62–77.

A catalogue 1991

A catalogue to accompany the exhibition Architecture and Archaeology: The work of Sheila Gibson. Rome : The British School at Rome, 1991.

Bell 1985

Bell L. Luxor Temple and the Cult of the Royal Ka // *Journal of Near Eastern Studies*. 1985. Vol. 44 (4). Pp. 251–294.

Charron et al. 2011

Charron A., Coulon G., Genot A., Golvin J.-C., Ben Hassen H., Heijmans M., Jacobi D., Toutain L., Vergnien R. Jean-Claude Golvin: un architecte au cœur de l'histoire. Paris : Errance, 2011.

El-Saghir et al. 1986

El-Saghir M., Golvin J.-C., Reddé M., El-Sayed H., Wagner G. Le camp romain de Louqsor (MIFAO 83). Le Caire : l'Institut français d'archéologie orientale, 1986.

Franke 2013

Franke R. The headquarters buildings in the Tetrarchic fort at Nag el-Hagar (Upper Egypt) // *Journal of Roman Archaeology*. Portsmouth, 2013. Vol. 26. Pp. 456–463.

Hookk 2013

Hookk D. From illusion to reality: transformation of the term virtual archaeology // *Virtual archaeology (nondestructive methods of prospection, modeling, reconstruction): proceedings of the First international Conference held at the State Hermitage Museum*. 4–6 June 2012. Saint Petersburg : The State Hermitage Publishers, 2013. Pp. 7–12.

Karelin 2015

Karelin D.A. Reflection on Some Architectural Peculiarities of the Late Roman Principia in Egypt by the Example of Luxor // *Limes XXII. Proceedings of the XXIIth International Congress of Roman Frontier Studies held in Ruse, Bulgaria (September 2012)* / ed. by Vagalinski L., Sharankov N. Sofia, 2015. In press.

Klotz 2012

Klotz D. Caesar in the City of Amun. Egyptian Temple Construction and Theology in Roman Thebes. Turnhout: Brepols, 2012.

Mackensen 2006

Mackensen M. The Late Roman Fort at Nag el-Hagar near Kom Ombo in the Province of Thebaïs (Upper Egypt) // *Mitteilungen des Deutschen archäologischen Instituts (Abt. Kairo)*. 2006. Vol. 62. Pp. 161–193.

Mackensen 2009

Mackensen M. The Tetrarchic Fort at Nag el-Hagar in the Province of Thebaïs: Preliminary Report (2005-08) // *Journal of Roman Archaeology*. 2009. Vol. 22. Pp. 286–312.

Qaṣr-Qārūn 1969

Qaṣr-Qārūn / Dionysias 1950: Rapports II (Fouilles franco-suissees 2) / par J. Schwartz; avec la collaboration de A. Badawy, R. Smith, H. Wild. Le Caire: Institut français d'archéologie orientale, 1969.

Wareth, Zignani 1992

Wareth U., Zignani P. *Nag al-Hagar. A Fortress with a Palace of the Late Roman Empire* // *Bulletin de l'Institut français d'archéologie orientale*. 1992. Vol. 92. Pp. 185–210.

F.I. Apollonio, F. Fallavollita,
E.C. Giovannini
University of Bologna, Italy

PORTA AUREA IN RAVENNA: A DIGITAL HYPOTHETICAL RECONSTRUCTION

1. Introduction

In the last few years thanks to the developments in the field of computer visualization we insisted on a widely diffused use of 3D modelling and virtual reconstructions as a visualization tool for documentation and analysis of archaeological evidence (Pollini et al. 2005).

New technologies in cultural heritage documentation, analysis and interpretation of archaeological artefacts show lots of methodological and theoretical problems concerned with interpretation and representation based on a variety of different sources and their analytic study with a multidisciplinary approach (Dell'Unto et al. 2013).

This case study is focused on theoretical and analytical study of virtual reconstruction practice of architectural heritage no longer existing and partially documented and on exploration of a methodological approach to displaying the data-processing behind the 3D modelling (Apollonio et al. 2013a).

The goal is to define a workflow based on the analysis of the existing sources as disparate as historic documentation, different techniques of surveying archaeological fragments and their 3D representation (Stefani et al. 2011) in order to validate the modelling process and to facilitate the exchange of information and collaboration between experts in various disciplines (Munster 2013).

In this paper we report a study related to the virtual reconstruction of Porta Aurea in Ravenna, in order to make understandable the workflow based on drawings, sketches and old survey, implemented by digital technologies survey, identifying different levels of uncertainty by the use of a gradient colour scale (Apollonio et al. 2013b).

2. Case study: Porta Aurea in Ravenna

Porta Aurea is a Roman gate situated on the south-west of the city walls of Ravenna.

Built in the first half of the 1st century BC the gate is contemporaneous with the city walls constructed at the behest of the Emperor Tiberio Claudio.

Extant nowadays are only the ruins of two round towers that probably bordered Porta Aurea.

The archaeological excavations, carried out between 1906 and 1908, brought to light not only the foundations of the two round towers but also some architectural fragments that are preserved in the Archaeological Museum of Ravenna and give us an idea of the majesty of the ancient Roman gate.

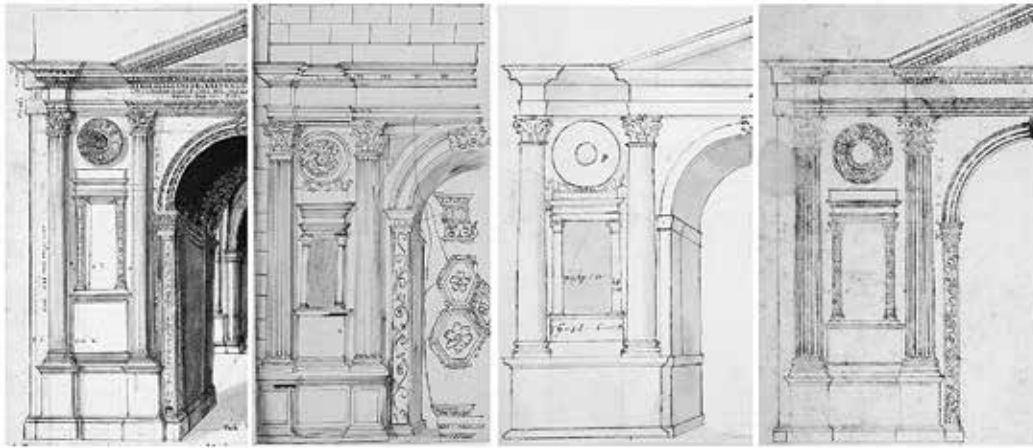


Fig. 1.
Samples of architectural drawings and sketches of Porta Aurea

Porta Aurea is described as a double-fronted structure characterized, on the front façade, by a double archway with pointed arches, each framed by two half-columns with Corinthian capitals supporting the entablature and pediment. On both sides, always within half-columns, there are niches topped with medallions. On the back side the half-columns are replaced by lesenas (pilasters), each supporting the entablature.

The proposed virtual reconstruction is based on combining the reality-based survey of some archaeological findings – used as reference elements – with a wide selection of historical sources (architectural drawings, sketches and ancient survey drawings from the 13th century up to the middle of the 20th century) in order to formulate reliable hypotheses related to the representation and visualization of different architectural elements (characterized by a defined level of uncertainty).

2.1 Sources: architectural drawings and sketches

In the 16th century relevant drawings and sketches were widely produced, mostly by such famous architects as Andrea Palladio, Pirro Ligorio and G.B. da Sangallo but also by anonymous authors (Tosi 1986).

In 1526 G. B. da Sangallo recorded the ancient entrance to the city. This drawing (Uffizi Gallery, Florence, Arch. 2057) shows us the front façade, a plan and some sketches of ornamental details. The author mentions that Porta Aurea's basements were under water and the unit he used was the Roman foot (about 29.6 cm).

Some years later, during his trips to Rome in 1544, Andrea Palladio drew the gate. The drawing is now part of RIBA Library Archives Collection in London (Ref. No. RIBA31821: SC220/XII/12r; Ref. No. RIBA31822: SC220/XII/12v). The folio, its both sides, clearly records the two façades and the plan. The architectural elements and ornamental details are based on the *pie de vicentino* unit (about 35.7 cm), documenting the architect's first-hand knowledge of the monument (Zorzi 1958).

Probably edited a few years later, there is another drawing, also made by Palladio, stored at the Museum of Vicenza (Inv. D-31), which shows the gate in a romantic way and represents only the front side facing the city.



Fig. 2.
Porta Aurea, data analysis and modelling pipeline

Another important document is a sketch stored at the Museumslandschaft Hessen Kassel (Fol. 45, Inv. Nr. GS 9638). This sketch is part of the Kassel Code, a fragmentary book of drawings edited by an unknown author.

Porta Aurea is depicted there as a gate incorporated in a city building, like Porta Borsari in Verona. A special feature of this representation, even though devoid of any measurements, is the deliberate intention to record not only the monument but also its urban context (Nes-selrath 2002).

Of uncertain date are two other drawings from the Kassel Code. The author is an artist known as Anonymous Berlin. These drawings (Hdz. 1245 r/v, Hdz. 1246 r/v) kept in the Kunstbibliothek – Staatliche Museen zu Berlin represent carefully measured architectural details. The anonymous artist provides us with a lot of important information on the measurements of the architectural details using a unit which he explains in the drawing itself.

In Volume XV of "Roman Antiquities" (Fogli 14 verso, 15 recto e verso, 16 verso), Pirro Ligorio talks about the city of Ravenna, giving an accurate description of the gate with some drawings supplied with measurements: a perspective view of the front façade (fol. 14v – fol. 15r), a plan and back façade (fol. 15v). The author suggests the typical Roman gate was a four-sided structure. This hypothesis has not been verified in any way, and could be investigated only through a new campaign of excavations at the city walls.

Ligorio's can be considered the last direct record of the monument because in 1582 Porta Aurea was completely demolished.

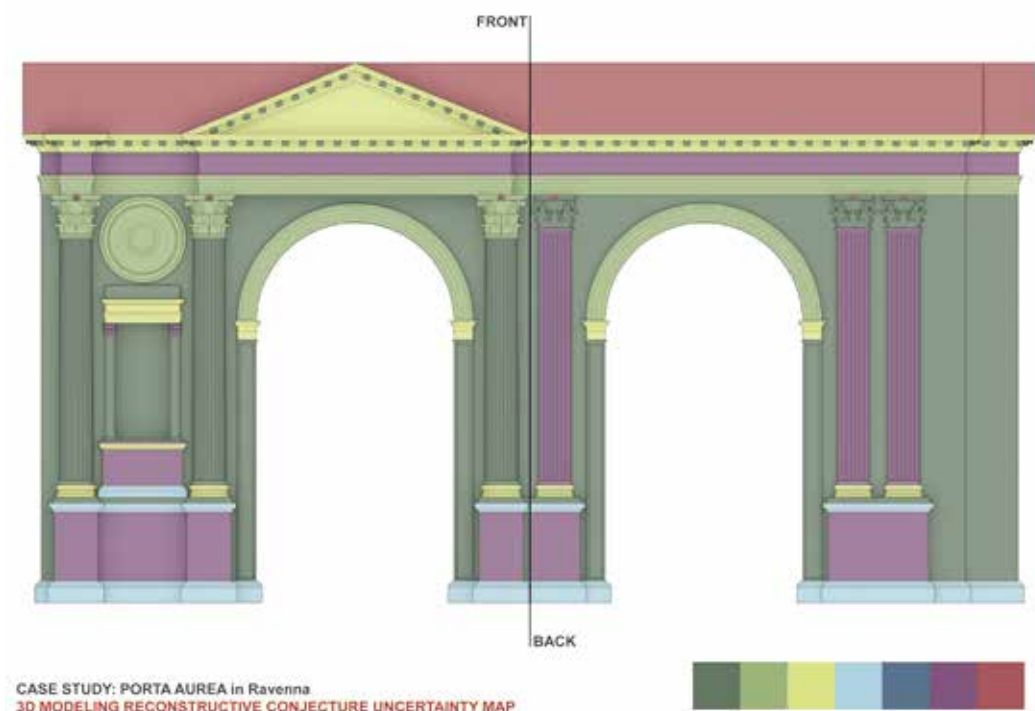


Fig. 3.
Porta Aurea, 3D modelling reconstructive conjecture uncertainty map

2.2 Surveying the data

The survey involved two phases of work with Leica C10 laser scanning.

The first one was done inside the National Museum of Ravenna which stores lots of architectural fragments, probably referred to Porta Aurea. In parallel with this survey campaign it was necessary to carry out classification and cataloguing of all marble fragments through the cross-sectional study of the Photographic and Inventory Archives of the Superintendence for Architectural Heritage and Landscape of Ravenna (SBAP-Ra). This analysis, completed by the comparison with the historical documents, permitted to identify fragments that are to be considered for sure as part of Porta Aurea and that were involved in the process of virtual anastylosis.

The second campaign of survey was concerned with the evidence of the foundations of the two round towers on the city walls. The results were compared with the data of the excavation report, done between 1906 and 1908, and used to check the overall size of Porta Aurea.

3. The 3D modelling process and virtual reconstruction

The virtual 3D reconstruction of Porta Aurea demonstrates the necessity to make explicit the link between the evidence and its interpretation, due to an overabundance of conflicting or lacking data. Even if the most of the elements are recognizable, there are differences between depictions of architectural and ornamental details in different drawings as well as measure units used by the artists. Palladio gives us an idea of what the back façade looked like, while in other drawings this can only be deduced from the plan.

The modelling procedure was based on different levels of interpretation, characterized by a progressively increasing level of uncertainty, through a gradient colour code (Apollonio et al. 2013b), where the first level involves a 3D reconstruction based on the documents related to the original project or perhaps first-hand knowledge of the artists and the last is completely devoid of any reference.

Conclusions

This case study, involving some fundamental problems related to the definition of reconstructive hypotheses, has been used as an inductive test able to verify the assumptions used during the reconstruction pipeline. The digital model based on the gradient colour code is a valuable documentation of different possible interpretations related to every singular architectural element.

The experience gained in the case study shows how the encoded system is adopted; although adequate to give a clear answer to the problem and plain representation of the level of uncertainty, it still needs to be implemented by a suitable metadata system (Kuroczyński et al. 2015) able to reconstruct the document and cognitive framework of references.

Acknowledgments

Access to the architectural fragments and archives was generously provided by Superintendent Arch. Antonella Ranaldi and Arch. Paola Novara (Superintendence for Architectural Heritage and Landscape of Ravenna) and all others international institutions that have contributed to this study.

References

Apollonio et al. 2013a

Apollonio F. I., Gaiani M., Sun Z. 3D modelling and data enrichment in digital reconstruction of architectural heritage. CIPA 2013: XXIV International CIPA Symposium. Strasbourg, 2013. Pp. 43–48.

Apollonio et al. 2013b

Apollonio F. I., Gaiani M., Sun Z. Characterization of uncertainty and approximation in digital reconstruction of CH artifacts. Le Vie dei Mercanti : XI Forum Internazionale di Studi. Aversa-Capri, 2013. Pp. 860–869.

Dell'Unto et al. 2013

Dell'Unto N., Ferdani D., Leander Touati A.M., Dellepiane M., Callieri M., Lindgren S. Digital reconstruction and visualization in archaeology case-study drawn from the work of the Swedish Pompeii Project. Digital Heritage International Congress. 2013. Pp. 621–628.

Kuroczyński et al. 2015

Kuroczyński P., Hauck O. B., Dworak D. Virtual museum of destroyed cultural heritage –3D documentation, reconstruction and visualisation in the semantic Web // Virtual Archaeology (Methods and Benefits). Proceedings of the Second International Conference at the State Hermitage. Saint Petersburg : The State Hermitage Publishers, 2015. Pp.

Munster 2013

Munster S. Workflows and the role of images for virtual 3D reconstruction of no longer extant historic objects. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. II-5/W1. 2013. Pp. 197–202.

Nesselrath 2002

Nesselrath A. Anonimo Mantovano // C.L. Frommel, S. Ray, M. Tafuri. Raffaello Architetto. Milan : Electa, 2002. Pp. 441–442.

Pollini et al. 2005

Pollini J., Dodd L. S., Kensek K., Cipolla N., Getty Research Institute. Problematics of making ambiguity explicit in virtual reconstructions: a case study of the Mausoleum of Augustus. Theory and Practice: Proceedings of the 21st Annual Conference of CHArt: Computers and the History of Art. London : British Academy, 2005. Available: <http://www.chart.ac.uk/chart2005/papers/toc.html>. Accessed 1 February 2015.

Stefani et al. 2011

Stefani C., Busayarat C., Renaudin N., De Luca L., Florenzano M. An image-based approach for the architectural modelling of past states // Proceedings of the 4th ISPRS International Workshop. Vol. 38. 2011. Pp. 397–404.

Tosi 1986

Tosi G. La Porta Aurea di Ravenna e un disegno di Andrea Palladio // Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts. 1986. Vol. 93. Pp. 425–470.

Zorzi 1958

Zorzi G. I disegni delle Antichità di Andrea Palladio. Venice : Neri Pozza Editore, 1958.

С. В. Бахвалов, Ф. С. Малков

ИрННТУ, Россия

О СОЗДАНИИ ВИРТУАЛЬНЫХ ЭКСПОЗИЦИЙ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

В лаборатории археологии, палеоэкологии и систем жизнедеятельности народов Северной Азии НИ ИрГТУ (далее – лаборатория археологии ИрГТУ) с 2012 года начаты работы по трёхмерному сканированию археологического материала (Малков 2013а. С. 37–39). После накопления некоторого количества материалов 3D-сканирования в лаборатории археологии ИрГТУ стал обсуждаться вопрос о возможности их публикации в Интернете и предоставления доступа к ним другим исследователям. Для решения этой проблемы в 2013 году на кафедре автоматизированных систем Института кибернетики ИрГТУ была начата работа по созданию информационной системы для публикации археологического материала (Малков 2013б. С. 183; Малков 2014а. С. 31).

Ограниченность финансовых ресурсов археологических лабораторий, как правило, не позволяет внедрять сложные информационные системы и обеспечивать администрирование и поддержку этих систем в рабочем состоянии, в связи с чем для реализации информационной системы было решено использовать только открытые и бесплатные технологии. Архитектура информационной системы должна строиться на модульном принципе, а для упрощения работы с ней необходимо только наличие Интернета и веб-браузера. Также должна быть предусмотрена возможность экспорта экспозиций в офф-лайн режим, например, для использования в электронных киосках.

Анализ специфики работы лаборатории археологии ИрГТУ, имеющихся в её распоряжении площадей для размещения археологических находок, а также сложность получения доступа посетителям для просмотра материалов заставляет задуматься о возможном применении информационных технологий. Один из вариантов – разработка модуля создания и проведения виртуальных экспозиций в рамках разрабатываемой системы.

При разработке технического задания на реализацию модуля были учтены технические рекомендации министерства культуры РФ (Технические рекомендации...), а также проанализированы имеющиеся решения по реализации экспозиций (туров). Например, сайт проекта Smithsonian X 3D (<http://3d.si.edu/tour-browser>), на котором публикуются 3D-модели и виртуальные туры по историческим и археологическим предметам. Также существуют сайты общего назначения sketchfab.com и p3d.in, на которых исследователи публикуют 3D-модели исторических и археологических материалов.

Были сформулированы основные требования к разрабатываемому модулю информационной системы:

- Простой и интуитивно понятный интерфейс;
- Наличие пошаговых инструкций по созданию экспозиций;
- Гибкая система настройки модуля;
- Хранение всех используемых данных в базе данных;
- Возможность сохранения истории действий пользователя.

Рассматривая опыт реализации реальных экспозиций и их виртуальных аналогов, необходимо также учитывать такие аспекты организации экспозиций, как:

- Ограничение времени проведения экспозиции (временная или постоянная экспозиция);
- Возможность переноса функций реальной витрины в виртуальное пространство со всеми преимуществами виртуального мира;
- Тематическая составляющая экспозиций.

При этом в виртуальные экспозиции могут включаться 3D-модели не только археологических находок, но и в целом археологических памятников, и процесса их раскопок, полученные как в результате моделирования, так и в результате 3D-сканирования.

Рассмотрим многоуровневое сканирование памятников археологии, проведенное лабораторией археологии ИрГТУ в 2013 году на примере могильника Окошки I в юго-восточном Забайкалье (Малков 2014б. С. 314–316). Трёхмерные интерактивные модели, построенные на основе реальных находок, позволяют любому заинтересованному человеку увидеть результаты такими, как видел их исследователь в момент открытия (Зайцева 2014. С. 300–302).

При разработке технического задания на модуль было предложено три варианта уровней создания виртуальных экспозиций, при этом учитывалось, что вышестоящие уровни включают в себя функции нижестоящих.

Первый вариант: виртуальная экспозиция отдельно взятой вещи, изображения или постройки.

На 3D-модели отмечаются маркерные точки, по которым посетитель может выбрать интересующие его ракурсы просмотра. При выборе маркерной точки выводятся все сведения, которые на данный момент исследователь получил при изучении данного объекта. Также возможен вариант реализации, при котором имеющаяся информация выводится при пошаговом просмотре 3D-модели предмета (остановка на самых важных деталях, представленных в нужном ракурсе). Описание объекта, кроме непосредственно 3D-модели, может содержать карту с указанием местонахождения предмета, фотографии самого объекта и его местоположения; дополнительные рисунки, схемы и чертежи; результаты анализов; заключения экспертов; ссылки на аналоги предмета, публикации и прочее. Кроме того, для оценки уровня достоверности представленных результатов важно хранить и предоставлять информацию о том, с помощью какого оборудования или метода была получена представленная модель. Примером реализации такого виртуального 3D-тура может являться разработка Смитсоновского университета (<http://3d.si.edu/tour-browser>).

Второй вариант: виртуальная экспозиция коллекции; тематической подборки предметов (холодное оружие, украшения, нумизматика и т. д.).

В этом случае также возможны два варианта создания экспозиции:

1. На основе панорамы реального помещения с витринами, стендами и прочим, на которых можно разместить экспонируемые предметы, снабдив их ссылками на 3D-модели. Подобный подход реализован в программе Tourweaver (позволяет в панораме вставлять 3D модели в формате *.3ds с ограничением в 65 тысяч полигонов);
2. На основе специально подготовленной 3D-модели помещения, по которой можно перемещаться с обходом витрин, стендов и стеллажей.

В обоих случаях система должна иметь интуитивно-понятный инструментарий создания панорам или 3D-моделей помещений, витрин, стеллажей, а также простые способы размещения на них экспонатов и прочей информации.

Виртуальные экспозиции могут объединяться в виртуальные музеи (Технические рекомендации...).

Третий вариант: виртуальная экспозиция процесса археологических раскопок.

В процессе раскопок происходит поэтапное 3D-сканирование места проведения раскопок, при этом модель может быть получена различными способами, например, фотографирование для создания 3D-моделей методами фотограмметрии или получение 3D-моделей с использованием сканеров. Все полученные данные загружаются в систему и накладываются послойно друг на друга. На каждом слое отмечаются находки и даются ссылки на их 3D-модели (ссылка может указывать на виртуальный тур по предмету). Для каждого слоя из базы данных выбираются фотографии, рисунки и чертежи, дополненные комментариями о процессе раскопок и любыми другими интересными для посетителя музея фактами. Если 3D-модель отсутствует, то может быть предоставлена качественная фотография предмета или, если это памятник, карта его месторасположения. В итоге посетитель может передвигаться по раскопкам, смотреть, как проводились исследования, убирать верхние слои памятников и узнавать новое про каждый слой, про особенности раскопок тех или иных памятников, про находки предметов и их расположение.

Подобный вариант экспозиции можно реализовать в виде интерактивной игры, добавив археологические инструменты, перенесённые в виртуальное пространство. В результате получится, что по мере расчистки памятника система сможет контролировать порядок действий пользователя, и по мере нахождения пользователем объектов выдавать информацию об их состоянии и назначении. Этот вариант может быть полезен не только для популяризации археологии, но и для обучения студентов-археологов и волонтеров.

Все предлагаемые варианты реализации виртуальных экспозиций можно использовать как в автономном варианте, так и помещать их в различные виртуальные миры, а также дополненную реальность, что становится особенно популярным в последнее время.

В учебных целях в конце виртуальной экспозиции можно предлагать посетителю тест на усвоение материала.

Существующие на данный момент информационные технологии позволяют реализовать любой из предлагаемых вариантов виртуальных экспозиций. Такими технологиями для работы с 3D-данными прямо в браузере являются технологии на базе JavaScript и XML:

- X3d;
- Three.js;
- WebGL;
- Canvas;
- o3d;
- 3DMWL;
- 3DXML и другие.

Реализация клиентской части для посетителей экспозиций и научных работников основывается на HTML5, CSS3, AJAX и библиотеках JavaScript. В качестве СУБД предлагается использовать PostgreSQL ввиду её бесплатности и открытости. При выборе остальных технологий для реализации информационной системы приоритет должен быть за технологиями, распространяемыми под свободными лицензиями с открытым исходным кодом. Для создания некоторых элементов виртуальных экспозиций может применяться дополнительное программное обеспечение.

Всё вышеперечисленное относится к программной реализации виртуальных туров археологического материала, но после некоторой доработки, учитывающей специфику работы музеев, может применяться и в музейном деле.

Учитывая возможные сложности с поддержанием работоспособности подобных систем силами самих лабораторий, идеальным вариантом решения этой проблемы является единый специализированный дата-центр со специалистами, которые будут обслуживать данную систему. Помимо обслуживания, на специалистов дата-центра должны быть возложены задачи по исправлению замечаний пользователей. Имея единую централизованную систему подобного рода, музеи и археологические лаборатории получают возможность не задумываться об обеспечении сохранности результатов исследований, поддержке автономных систем, и высвободившиеся ресурсы направлять на решение других задач.

Литература

Зайцева 2014

Зайцева О. В. 3D-фиксация и визуализация результатов археологических раскопок: сравнение методик трёхмерного сканирования и наземной фотограмметрии // Труды IV (XX) Всероссийского археологического съезда в Казани. 2014. Т. 4. С. 300–302.

Малков 2013а

Малков Ф. С. 3D-формат в археологических исследованиях и новые возможности представления результатов работ // Археология, этнология и антропология АТР. Междисциплинарный аспект: материалы докладов LIII Региональной (IX Всероссийской с международным участием) археолого-этнографической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 24–30 марта 2013 г., Владивосток / отв. ред. Н. Н. Крадин, Ф. Е. Ажимов; ред. кол. А. Н. Попов, А. А. Крупяно, Б. В. Лазин, Д. Г. Кудряшов. Владивосток : Издательский дом Дальневост. федерал. ун-та, 2013. С. 37–39.

Малков 2013б

Малков Ф. С. Анализ реализаций и возможностей для создания информационной системы публикации археологического материала // Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Информационные технологии. Новосибирск : Новосиб. гос. ун-т, 2013. С. 183.

Малков 2014а

Малков Ф. С. Разработка информационной системы публикации археологического материала // Материалы 52-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2014: Информационные технологии. Новосибирск : Новосиб. гос. ун-т, 2014. С. 31.

Малков 2014б

Малков Ф. С. Использование 3D-сканеров для фиксации погребальных комплексов на примере могильника Окошки I в юго-восточном Забайкалье // Современные проблемы древних и традиционных культур народов Евразии: тез. докл. LIV Региональной (X Всероссийской с международным участием) археолого-этнографической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 130-летию открытия палеолита на Афонтовой горе и 100-летию первых раскопок памятников андроновской культуры, Красноярск, 25–28 марта 2014 г. / отв. ред. П. В. Мандрыка. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. С. 314–316.

Технические рекомендации 2014

Технические рекомендации по созданию виртуальных музеев. Версия 1.0. [Электронный ресурс]. URL: http://mkrf.ru/upload/mkrf/mkdocs2014/25_07_2014_1.doc. (дата обращения: 20.11.2014).

А. А. Никитин

Компания VR Lab., Россия

А. В. Никитин

ГУАП, Россия

А. А. Никитина

Компания VR Lab., Россия

Н. Н. Решетникова

ГУАП, Россия

КОМПЬЮТЕРНЫЕ РЕКОНСТРУКЦИИ КРЕПОСТИ ЯМ–ЯМБУРГ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРАКТИВНОГО ПОГРУЖЕНИЯ

Крепость Ям-Ямбург (до XVIII века – Ям, до 1922 года – Ямбург, в настоящее время – г. Кингисепп Ленинградской области) расположена в северо-западной части России на берегу р. Луги. Была построена в конце XIV века как важный форпост на западной границе Руси. История строительства крепости включает различные периоды, в том числе шведский (1581–1590, 1612–1703). В настоящее время сохранились остатки бастионной системы XVII–XVIII веков (северные бастионы с куртинами, ров и пруд), обозначающие контур крепости, а также в земле фрагменты нижних частей каменных укреплений XIV–XVI веков, раскопанные А. Н. Кирпичниковым (Кирпичников 1984. С. 180–209). Сейчас на территории крепости находится здание Кингисеппского историко-краеведческого музея.

С целью сохранения и популяризации исторической информации об утраченном объекте культурного наследия, а также создания информационного ресурса для туризма в 2013–2014 годах в рамках программы «Сохранение и использование культурного наследия в России» выполнялся **проект** «История крепости Ям».

Участники проекта: Музейное агентство Ленинградской области, Кингисеппский историко-краеведческий музей, Институт истории материальной культуры РАН, лаборатория компьютерной графики и виртуальной реальности ГУАП, компания VR Lab., Фонд инвестиционных строительных проектов Санкт-Петербурга.

Работы осуществлялись на основе:

- собранных Кингисеппским историко-краеведческим музеем документальных материалов и художественных реконструкций, а также специально подготовленных сотрудниками музея материалов для проекта под руководством директора И. В. Грековой;
- опубликованных работ А. Н. Кирпичникова, В. И. Кильдюшевского, Н. Ю. Скрипинской;
- консультаций сотрудников ИИМК РАН А. Н. Кирпичникова и Н. Ю. Скрипинской;
- анализа реально существующих аналогов-крепостей Порхов, Ивангород, Копорье.

При реализации проекта использовались технологии интерактивного погружения (Архитектура 2009. С. 100–149; Никитин, Решетникова 2012), которые обеспечили следующую базовую функциональность приложений:

- погружение в трёхмерную аудиовизуальную (full HD, моно + стерео) среду с использованием настольных, мобильных (планшеты, смартфоны) и поверхностных систем (3D-демонстрационный зал на 20 человек с экраном и мультимедийным проектором);
- перемещение в трёхмерной среде и взаимодействие с объектами в реальном времени посредством контактного (клавиатура, мышь, 6DOF манипулятор, касания) и бесконтактного (распознавание жестов и телодвижений на основе сенсора MS Kinect) интерфейсов;
- индивидуальный доступ от 1-го или 3-го лица;
- использование 3D-персонажей для взаимодействия с моделью крепости от 3-го лица;
- дополнение визуального и слухового восприятия посетителя музея виртуальными объектами на основе мобильных систем (планшеты, смартфоны);
- локальная доставка приложений пользователю.

Результаты выполнения проекта:

- интерактивные 3D-модели крепости Ям-Ямбург: четырехбашенная (XIV век), девятибашенная (XV век) и земляная бастионная (XVIII век);
- виртуальные экскурсии на основе моделей крепостей;
- исторические 3D-игры «Оборона крепости» и «Подрыв крепости»;
- приложение «Дополненная реальность», предназначенное для информационного обеспечения экспозиции музея и прилегающей к нему территории;
- мультимедийные информационные системы «Личности в истории крепости Ям», «Крепости северо-запада России» и «Памятники Яма-Ямбурга-Кингисеппа».

Опишем результаты проекта более подробно.

1. Интерактивные 3D-модели крепости Ям-Ямбург, демонстрирующие различные этапы строительства: четырехбашенная (XIV век), девятибашенная (XV век) и земляная бастионная (XVIII век) (платформа – PC, Windows, моно/стерео).

Предварительно отметим, что для каждой крепости разрабатывался следующий набор моделей:

- ландшафт местности, соответствующий рассматриваемому периоду времени и включающий участок реки, разные виды почв, зоны и виды растительности (трава, деревья и их породы), сеть дорог и их покрытие, овраги, водоёмы, переправу.
- внешний и внутренний вид башен и стен крепости;
- постройки внутри крепости и на прилегающей территории;
- русский воин для свободного перемещения по модели крепости от 3-го лица.

Доступ к модели осуществлялся через интерактивную карту (обозначены основные объекты крепости и значимые элементы ландшафта) или список объектов крепости. Свободное перемещение по модели крепости было реализовано при помощи персонажа (режим от 1-го или 3-го лица), управлять которым можно было с использованием жестов или шестистепенного манипулятора.

Для упрощения навигации и работы с моделью крепости была разработана двухмерная миникарта, постоянно отображаемая в окне приложения и демонстрирующая текущее местоположение взаимодействующего с моделью пользователя. Под мини-



Рис 1.
Моделируемая территория (Google Maps)

картой располагался выпадающий список внутрикрепостных объектов для быстрого перемещения по ним.

Для значимых объектов крепости были разработаны информационные ресурсы (текст, изображения), наличие которых отмечалось на модели специальными иконками. Активация иконок в процессе перемещения персонажа (аватара) приводило к открытию дополнительного информационного окна.

На рис. 1 представлен фрагмент моделируемой территории.

Рассмотрим основные элементы каждой модели крепости.

Крепость четырехбашенная (1384 год)

Модель построена на основе опубликованных работ В. И. Кильдюшевского (Кильдюшевский, Курбатов 1995. С. 103–105), А. Н. Кирпичникова (Кирпичников 1984. С. 180–262).

Модель крепости соответствует каменному фортификационному сооружению XIV века и включает следующие объекты:



Рис. 2.
Общий вид модели четырехбашенной крепости

Элементы крепости:

- внешний и внутренний виды каменных башен;
- воротное устройство с входными воротами в северо-западной башне;
- каменные стены между башнями с боевым ходом и каменной лестницей с внутренней стороны;
- ров вокруг крепости;
- мост через ров к входным воротам.

Внутрикрепостные сооружения:

- дорожки;
- внешний вид застройки крепости жилыми и хозяйственными постройками (деревянные избы);
- внешний вид храма Архистратига Михаила.

Объекты за периметром крепости:

- избы у переправы.

Персонаж для взаимодействия пользователя с моделью крепости в режиме работы от 3-го лица – новгородский стрелец XIV века.

На рис. 2 представлен скриншот модели крепости.

Крепость девятибашенная (1448 год)

Модель построена на основе работы А. Н. Кирпичникова (Кирпичников 1984. С. 180–209).

Модель крепости соответствует каменному фортификационному сооружению XV века и включает следующие основные объекты:

Элементы крепости:

- внешний и внутренний виды каменных башен;
- воротные устройства с входными воротами;
- каменные стены между башнями с боевым ходом и тремя каменными лестницами;
- рвы вокруг крепости и вокруг детинца;
- частокол (по длине северной стены) с воротным обрамлением;



Рис. 3.
Общий вид модели девятибашенной крепости

- мосты через рвы к входным воротам (2 шт.).

Внутрикрепостные сооружения (внешний вид):

- дом коменданта;
- дом городского;
- осадные дворы (амбары);
- дорожки мощёные и немощёные;
- внешний вид храма Архистратига Михаила.

Объекты за периметром крепости:

- дворы.

Персонаж для взаимодействия пользователя с моделью крепости в режиме работы от 3-го лица – русский воин XVI века.

На рис. 3 представлен скриншот модели крепости.

Крепость бастионная (1703 год)

Модель построена на основе опубликованных работ А. Н. Кирпичникова (Кирпичников 1984. С. 180–209) и Н. Ю. Скрипинской (Скрипинская 2014. С. 249–260).

Модель крепости соответствует каменному четырехбашенному фортификационному сооружению XV века, окружённому земляными куртинами и четырьмя земляными бастионами 1703 года, и включает следующие объекты:

Ландшафт (за основу принимается существующий ландшафт местности с имеющимися элементами крепости – 3 бастиона, куртины, пруд, ров).

Элементы крепости:

- бастионы;
- куртины;
- ров с частокольной канавкой;
- входные ворота;
- мост через ров;
- каменный детинец;
- казематы.



Рис. 4.
Общий вид модели бастионной крепости

Внутрикрепостные сооружения (внешний вид):

- дом коменданта;
- пороховой погреб;
- амбары;
- храм;
- казармы;
- караульня;
- деревянные настилы под пушки;
- пушки;
- дорожки мощёные и немощёные.

Объекты за периметром крепости:

- избы (усадьбы).

Персонаж для взаимодействия пользователя с моделью крепости в режиме работы от 3-го лица – петровский солдат XVIII века.

На рис. 4 представлен скриншот модели крепости.

2. Аудиовизуальные виртуальные экскурсии по крепости (платформа – PC, Windows, моно/стерео).

Экскурсии подготовлены на основе записи с камеры, перемещаемой в режимах обхода или облёта по сценарной траектории в модели крепости с добавленными изображениями отдельных объектов, голосом диктора и фоновой музыкой.

3. Исторические 3D-игры «Оборона крепости» и «Подрыв крепости» с управлением перемещениями пользователя в игровом пространстве (платформа – PC, Windows, Kinect, моно/стерео). Работают в индивидуальном и соревновательном (два игрока) режимах.

Игра «Подрыв крепости»

Сюжет игры: Крепость Ям, 1682 год. Чтобы убрать обветшалую стену крепости, шведы заложили бочки пороха вдоль восточной стены и последовательно взорвали их. В результате взрывов в разные стороны разлетелись осколки и обломки каменной

кладки. Игрок, находящийся внутри крепости, должен уклониться от летящих на него обломков.

При попадании обломков в героя изменяются параметры его виртуального здоровья. Если уровень здоровья снижается до нуля, игрок проигрывает.

Игра «Оборона крепости»

Сюжет игры: Крепость Ям, 1444 год. Ливонцы осадили крепость и начали обстреливать её. Игрок находится на крепостном дворе, перед крепостной стеной, из-за которой вылетают стрелы, копья, ядра. За игроком расположены бочки с порохом (пороховой склад), которые он пытается защитить от летящих снарядов.

Цель игры – отбить летящие в крепость снаряды в пределах зоны ответственности, используя своё «бессмертное» тело. В случае пролёта снарядов через игрока и попадание в бочки, бочки исчезают, и изменяются параметры состояния порохового склада, при уменьшении которых до нуля игрок проигрывает.

4. Приложение «Дополненная реальность» (платформа – mobile, Android, iOS) предназначено для расширения аудиовизуального восприятия посетителя музея в реальном времени справочной информацией на основе маркерной дополненной реальности с использованием планшетного компьютера или смартфона. Приложение может использоваться как внутри здания музея, так и на прилегающей территории при ознакомлении с экспонатами, а также для просмотра печатного материала о музее (проспекты, буклеты, альбомы).

Определено 20 точек интереса (например, Фрагмент керамического сосуда, Клад шведских монет, Костюм ижорской женщины и др.) внутри здания музея и 5 точек интереса (например, Крепость 1384 года, Храм и др.) на прилегающей территории. Каждой точке соответствуют размещаемые рядом с экспозиционными объектами уникальные маркеры (чёрно-белые или цветные изображения), с которыми связывается тематическая информация в виде текста, изображений, аудио, видео, 3D-моделей.

5. Мультимедийные информационные системы (платформа – PC, Windows).

Система «Личности в истории крепости Ям» представляет собой портретную галерею изображений значимых персон и информацию о них (37 человек, например, Св. Ефимий, Иван Грозный, П. Делагарди, Пётр I, Б. Шереметев, А. Кирпичников и др.).

Система «Крепости северо-запада России» представляет собой интерактивную карту Ленинградской области и примыкающих территорий и содержит информацию о крепостях Выборгский замок, Гдов, Ивангород, Изборск, Копорье, Корела, Кронштадт, Новгород, Орешек, Петропавловская крепость, Порхов, Псков, Старая Ладога, Ям.

Система «Памятники Яма-Ямбурга-Кингисеппа» представляет собой интерактивную карту Кингисеппа с информацией о наиболее значимых объектах города (19 объектов, например, Городище крепости Ям, Гостиные дворы, Памятник жертвам гражданской войны, Ратуша и др.).

Основные инструменты разработки приведены в таблице.

Объект разработки	Инструменты
Интерактивные 3D-модели	Unity 3D, язык C#
3D-модели	Autodesk 3ds Max, Adobe Photoshop

Персонажи	Autodesk 3ds Max, Zbrush, Topogun
Анимации	Autodesk 3ds Max, Unity Mecanim
Управление жестами	MS Kinect SDK
Дополненная реальность	Qualcomm Vuforia
Чертежи	Autodesk AutoCAD
Мультимедиа	тексты (MS Word), изображения (Adobe Photoshop, Adobe InDesign, Adobe Illustrator), аудио (Adobe Audition), видео (Adobe Premiere).

Заключение

С помощью разработанных приложений сотрудники Кингисеппского историко-краеведческого музея получили возможность выработать инновационную платформу для решения экспозиционных, образовательных и маркетинговых задач. Кроме того, это способствовало увеличению мотивации, сенсомоторной и эмоциональной вовлеченности потенциального посетителя музея, предоставления ему возможности формирования личного опыта, в том числе недоступными в реальном мире способами.

В целях развития проекта планируется на базе одной из моделей крепости разработать многопользовательское приложение для сценарного и свободного общения пользователей, которое, в свою очередь, станет основой для онлайн-исторической игры.

На сайте компании “VR Lab.” (<http://vr-lab.com/>) и Лаборатории компьютерной графики и виртуальной реальности ГУАП (<http://guap.ru/labvr>) можно ознакомиться с дополнительными материалами к разработанным приложениям и видеороликами четырехбашенной крепости и игры «Подрыв крепости».

Литература

Архитектура 2009

Архитектура виртуальных миров: монография / А. Е. Войскунский, М. Б. Игнатъев, С. А. Козловский, А. А. Никитин, А. В. Никитин, Н. Н. Решетникова, С. П. Сенющенко, О. В. Смыслова, М. А. Селисская, С. С. Трошин; под ред. М. Б. Игнатъева, А. В. Никитина, А. Е. Войскунского; 2-е изд., перераб. и доп. СПб. : ГУАП, 2009.

Кильдюшевский, Курбатов 1995

Кильдюшевский В. И., Курбатов А. В. Новые исследования крепости Ям // Фортификация в древности и Средневековье (материалы методического семинара ИИМК) / отв. ред. В. М. Массон. СПб. : ИИМК РАН, 1995.

Кирпичников 1984

Кирпичников А. Н. Каменные крепости Новгородской земли. Л. : Наука, 1984.

Никитин, Решетникова 2012

Никитин А. В., Решетникова Н. Н. Технологическая платформа интерактивного погружения для культуры и современного искусства [Электронный ресурс] // Труды XIV Ежегодной международной конференции «EVA-2012 Москва», 26–28 ноября 2012 г., «Развитие и сохранение электронного культурного и научного наследия». М. : Российская государственная библиотека, 2012. URL: <https://eva.rsl.ru/ru/2012/report/list/1127> (дата обращения: 01. 02. 2015).

Скрипинская 2014

Скрипинская Н. Ю. Бастионная система крепости Ямбург // Stratum plus. Археология и культурная антропология. 2014. № 6.

Д. А. Булгаков
И. А. Дубков
Г. К. Логач
Н. Н. Решетникова
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия

Т. В. Рябкова
Государственный Эрмитаж, Россия

Н. В. Савельев
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Россия

ИНТЕРАКТИВНАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ 1-ГО РАЗМЕННОГО (КОСТРОМСКОГО) КУРГАНА: ЗАДАЧИ, ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ

Целью проекта является создание интерактивного мультимедийного приложения (ММП), включающего 3D-реконструкцию возведения скифского кургана для демонстрации результатов исследования эталонного памятника скифской архайки рубежа VII-VI веков до н.э.

Знаменитый Костромской курган (1-й Разменный), исследованный летом 1897 года проф. Н. И. Веселовским на территории Кубанской области, дал уникальные материалы (ОАК 1897. С. 11–15), на которых в значительной мере основаны современные представления о скифском присутствии в Предкавказье. Несмотря на важность этих материалов для науки, более 100 лет памятник оставался загадкой: дореволюционная методика раскопок глухой траншеей и особенности полевой фиксации не позволили получить достоверные сведения о его конструкции, а вещевой комплекс так и не был полностью опубликован. Изменить эту ситуацию могло лишь повторное исследование 1-го Разменного кургана, произведённое силами Южно-Кубанской археологической экспедиции в 2010–2012 годах (Рябкова 2013).

К наиболее актуальным задачам проекта следует отнести:

- представление фактических материалов археологических экспедиций, полученных в ходе полевых работ в наглядной форме, удобной для демонстрации;
- привлечение молодых специалистов, изучающих технологии создания виртуальных миров и ориентированных на индустрию компьютерных игр, к проектам сохранения историко-культурного наследия (Архитектура виртуальных миров 2009. С. 100–108, 209–235).

Технологии OpenGL и DirectX, появившиеся в середине 1990-х годов, на сегодняшний день являются наиболее перспективными в области разработки интерактивных приложений с элементами мультимедиа и 3D-графики, позволяя поддержи-

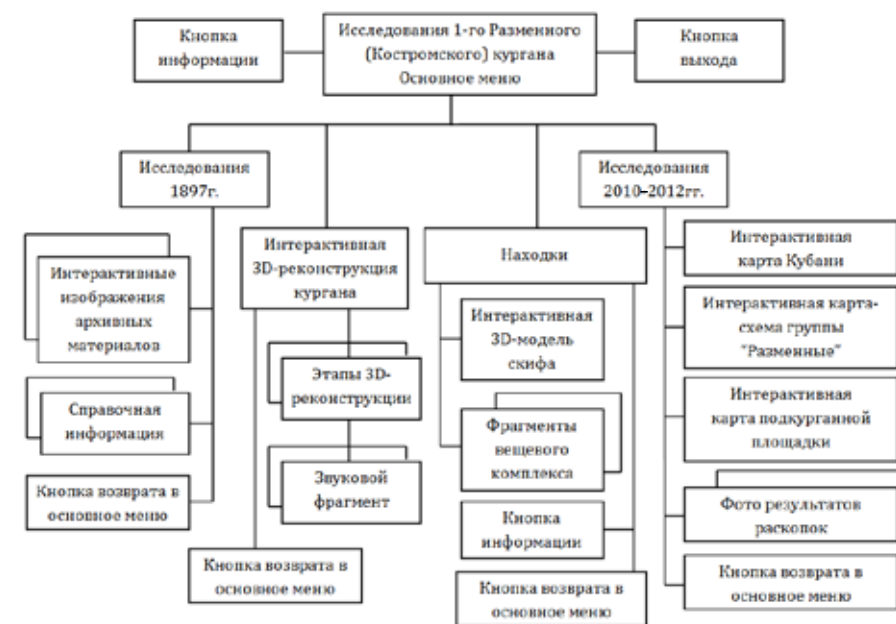


Рис. 1.1.
Иерархическая структура интерфейса интерактивного приложения

вать доступный (с позиций имеющихся программно-аппаратных средств) уровень погружения в виртуальное пространство. Для облегчения работы с этими технологиями создано большое количество библиотек и инструментов, называемых графическими движками (Graphic engine).

При разработке структуры приложения выбран подход, ориентированный на специфику исходных археологических материалов, предоставленных научным консультантом и активным участником проекта – Т. В. Рябковой, канд. ист. наук, с.н.с. Отдела археологии Восточной Европы и Сибири Государственного Эрмитажа. Это и определило визуальную форму представления фактического материала, полученного в результате полевых работ 1897 года и 2010–2012 годов, удобную для детального сравнительного анализа.

На основе предоставленных исходных материалов разработчики выполнили ряд эскизов интерфейса будущего приложения с учётом его функциональности, используя при этом редакторы растровой и векторной графики. В ходе проектирования обсуждались первоначальные эскизы, уточнялся дизайн интерфейсов, расположение функциональных элементов (кнопок, интерактивных изображений, элементов доступа к справочной информации и т. п.) и параметры 3D-объектов для дальнейшего моделирования и анимации.

При реализации проекта в графическом движке (Graphic engine) детально проработанные эскизы интерфейсов использовались в качестве шаблонов для программирования, тогда как структура их взаимосвязей определила набор элементов и функциональность разрабатываемого приложения.



Рис. 1.2.
Дизайн основного меню



Рис. 2.
Исследование 1-го Разменного (Костромского) кургана Н. И. Веселовским в 1897 году

Иерархическая структура интерфейса интерактивного приложения и дизайн основного меню приведены на рисунках 1.1 и 1.2 соответственно.

На основе структуры, представленной на рисунке 1.1, для разделов «1897 г.» и «2010–2012 гг.» подготовлены отдельные элементы (архивные материалы, фотографии, тексты, карты местности, планы раскопок и др.), каждый из которых обработан в графическом редакторе и оформлен в удобном для сравнительного анализа виде. Так, например, дореволюционная история исследования памятника представлена в разделе «1897 г.» (рис. 2).

Подход к разработке раздела «3D-реконструкция» (см. рисунок 1.2) аналогичен традиционному подходу, принятому в кинематографии: в процессе проектирования 3D-реконструкции возведения 1-го Разменного (Костромского) кургана разрабатывались сценарии (литературный, компонентный, рабочий).

Литературный сценарий, подготовленный научным консультантом проекта, определил порядок появления отдельных объектов в 3D-сцене, а также характер звукового сопровождения.

При разработке компонентного и рабочего сценариев для каждого этапа виртуальной реконструкции кургана были учтены параметры отдельных 3D-объектов (размеры, внешний вид, характер анимации при появлении объекта в 3D-сцене и др.). Трёхмерные модели объектов были подготовлены в пакете Autodesk 3ds Max (учебная версия) и затем импортированы в игровой движок Unity 3d для дальнейшей проработки. Следует отметить, что программная реализация интерактивного приложения на платформе Unity3d (Unity3d.com), включает не только стандартные возможности 3D-движка, но и собственные программные сценарии (scripts) и расширения



Рис. 3.
Вид экрана с изображением одного из этапов 3D-реконструкции кургана

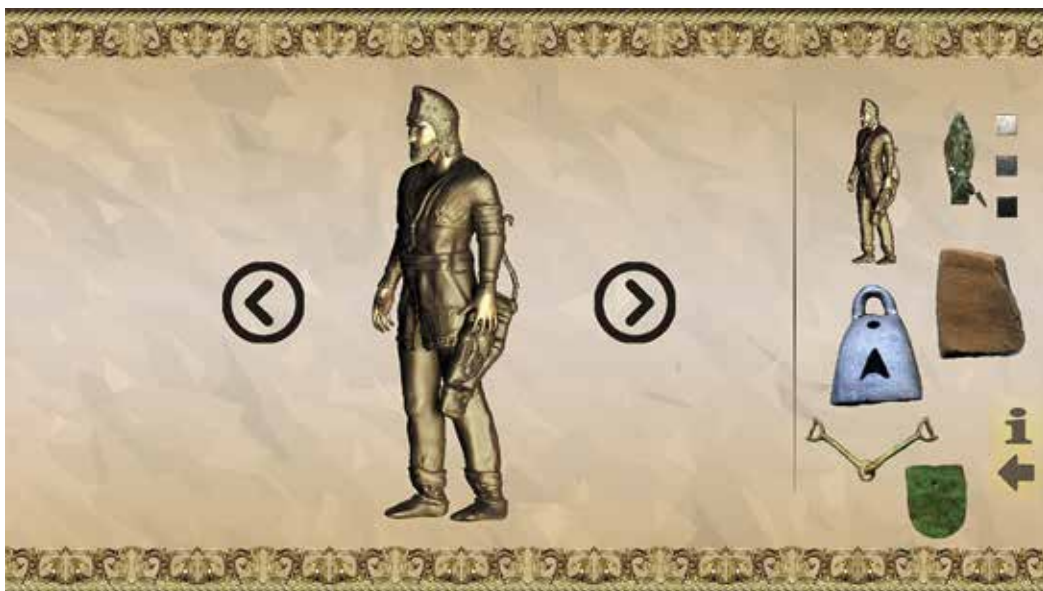


Рис. 4.
Вид основного экрана раздела «Находки»

редактора (editor extensions), разработанные авторами статьи. На рис. 3 приведена копия экрана (screen shot) одного из этапов 3D-реконструкции сооружения кургана, подготовленная для демонстрации на мониторе с сенсорным экраном (touch screen) в экспозиционном пространстве археологической выставки Государственного Эрмитажа. В представленной версии приложения отключён выбор этапов реконструкции посетителем, а также кнопка выхода.

Раздел «Находки» включает уникальную 3D-модель персонажа, разработанного в пакете скульптурного 3D-моделирования для демонстрации особенностей внешнего вида и костюма воина периода скифской архаики, а также некоторые фрагменты вещевого комплекса, обнаруженного в раскопе Костромского кургана (рис. 4).

В заключение следует отметить, что разработанное интерактивное приложение «Исследования 1-го Разменного (Костромского) кургана» может использоваться в образовательном процессе кафедры вычислительных систем и сетей СПбГУАП в рамках учебной магистерской программы «Системы мультимедиа и компьютерная графика». Дальнейшее развитие проекта возможно в части:

- повышения реалистичности 3D-сцен в процессе их интерактивной визуализации с заданным уровнем fps (frame per second);
- подключения уточнённых и новых 3D-моделей объектов, полученных в ходе анализа результатов археологических экспедиций;
- перехода к технологиям дополненной реальности с использованием мобильных средств доступа;
- разработке сетевых приложений для совместного использования в сети Интернет, а также различных видов публикаций (Web, компакт-диск и др.).

Кроме того, разработанное интерактивное приложение может быть полезно в качестве дидактического пособия при организации выставок, тематических экскурсий и проведении занятий в археологическом кружке Государственного Эрмитажа.

Инициативный проект «Интерактивная компьютерная реконструкция 1-го Разменного (Костромского) кургана» выполнен в рамках учебной магистерской программы «Системы мультимедиа и компьютерная графика» на кафедре вычислительных систем и сетей ГУАП в содружестве с отделом археологии Восточной Европы и Сибири Государственного Эрмитажа.

Литература

Архитектура виртуальных миров 2009

Архитектура виртуальных миров: монография / А. Е. Войскунский, М. Б. Игнатъев, С. А. Козловский, А. А. Никитин, А. В. Никитин, Н. Н. Решетникова, С. П. Сеньющенко, О. В. Смылова, М. А. Селисская, С. С. Трошин; под ред. М. Б. Игнатъева, А. В. Никитина, А. Е. Войскунского; 2-е изд., перераб. и доп. СПб. : ГУАП, 2009.

ОАК 1897

Отчёт Императорской археологической комиссии за 1897 год. 1900. СПб. : Типография Главного Управления делов.

Рябкова 2013

Рябкова Т. В. 1-й Разменный (Костромской) и 10-й Разменный курганы // Боспорский феномен. Греки и варвары на Евразийском перекрёстке: материалы Междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, 19–22 ноября 2013г.). СПб : Нестор-История, 2013. С. 378–385.

Unity3d.com

Unity3d.com: Game engine, tools and multiplatform. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.unity3d.com/> (дата обращения: 02.03.15).

3D-ДОКУМЕНТЫ: ДОСТУПНОСТЬ МЕТАДАННЫХ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ

3D DOCUMENTATION: METADATA AND THEIR ACCESSIBILITY

V. Barneche Naya, I. Hernández Ibáñez
University of Coruña, Spain

FROM THE DIG TO CYBERSPACE. A CASE STUDY OF VIRTUAL WORLDS AS A TOOL FOR INTERPRETATION CENTERS

1. Introduction

Interpretation centers have become a very adequate and viable solution for effective communication of heritage information in municipalities and rural areas which lack the resources for establishing a traditional, full-scale museum, and where heritage can be an important factor for tourism development.

Unlike traditional museums, interpretation centers do not usually aim at collecting, conserving and studying objects; they are specialized institutions for communicating the significance and meaning of heritage. They work to educate and raise awareness.

Many studies have demonstrated the capabilities of virtual worlds to enhance the learning process at all educational levels. Some of them, including previous works by the authors of this paper, come to the same conclusion in a scenery involving museums and schools for telepresential visits (Barneche 2014).

Although there are numerous cases of the use of heritage reconstruction in virtual worlds (Harrison 2009; Sequeira 2013; Barneche 2010), few examples can be found in the context of a real museum, like the case of Villa Livia (Forte 2008). The present work deals with the design of a dedicated, OpenSim based virtual world as a part of a real exhibition taking place in a small interpretation center: the Museum of the Mosaic of Casariche (Spain) devoted to the mosaics found in the dig of the Roman villa of El Alcaparral (4th – 5th century AD).

The virtual model was intended to accomplish two objectives. On the one hand, it should display a complete recreation of the mosaics found in the nearby excavation, allowing the visitors to contemplate the appearance of the pavements in their full size instead of just fragments. On the other hand, the villa model should be designed to act as built-in environment that could provide context for the interpretation of the mosaics.

2. Methodology

This work has been carried out in two phases; the first one consisted of the construction of the virtual model to be used for virtual exhibitions and activities, and the second one included all aspects of virtual musealization.

2. 1. Construction of the virtual model

Reconstruction of the mosaics:

The mosaics to be displayed can be separated into two groups. The first one includes those formed solely by geometrical motifs. Here, the modular and repetitive characteristics of the formal structure of the drawings allowed to easily obtain a possible full version



Fig. 1.
Geometrical mosaic in the atrium of the impluvium and reconstruction.
(photos from the intervention Report – above-and from the virtual world – below)

Fig. 2.
"The Judgment of Paris" mosaic (photos from the Intervention Report –
above, and from the virtual world – below)

of every original design. Patterns were repeated, in search of a coherent formal structure for every case in accordance with the dimensions and shape of every room. Apart from possible unknown irregularities or unexpected lost elements that could break the homogeneity of the design in the original mosaic, the reconstructed versions offer an image of every mosaic that would correspond approximately to the appearance of those ancient pavements (fig. 1).

The second group of mosaics is composed of those containing figurative designs. There were three mosaics in this group, in different states of preservation. The mosaic depicting the “Judgment of Paris” (fig. 2) was almost complete and only needed a few retouches to obtain its virtual replica.

The second one, called “The Spring”, mosaic lacked a large part of the face of the person represented, however the characteristics of the shape of the human face permitted to reconstruct it fairly well (fig. 3).

The third case, the mosaic that covered the bottom of the *impluvium*, was almost completely lost and only small parts were extant. Nevertheless, those parts indicated clearly that the original design depicted a scene containing two Nereids riding a Triton.

The detailed formal analysis of the remaining fragments revealed multiple similarities with other mosaics of the same age and similar theme found in excavations located in neighboring regions. That made the authors consider a great influence or even a common school authorship that might induce to think that the motif depicted in the original mosaic could be very similar. Hence, the scene was fully reconstructed, and the clear character of



Fig. 3.
“The Spring” mosaic in the virtual world



Fig. 4.
Impluvium in the virtual world with the reconstructed mosaic of Nereids riding a Triton

hypothesis of such reconstruction was indicated in the associated explanatory panel that floats over the element. Moreover, the virtual version helps understand the frequent use of marine scenes in *impluvia* and other hydraulic elements (fig. 4).

Finally, a generic mosaic was designed to be used in the rooms that presented more uncertainty in their layout, as a means to mark them as the most hypothetic part of the interpretation of the house.

Reconstruction of the villa:

In order to facilitate a better comprehension of late Roman architecture, the three-dimensional representation of this *villa olearia* which was made for this project tries to be as accurate as possible, based on all the data obtained from the archaeological dig, but considering the fact that the remains are neither abundant nor well preserved. Additionally, the authors interpreted the historical and ethnographical data available and analyzed other nearby *villas olearias* that present a similar terrain organization based on terraces of the same period as the *villa vinicola* of Fuente Alamo and the *villa agricola* of Villaricos.

Other reconstruction criteria for the making of the model were based on the current archaeological thought named Archaeology of Architecture (Steadman 1996; Azkarate 2002). This discipline provides analytical models and methodological tools that contribute significantly to the study of different dimensions of the built space. This work used the constructive analysis to obtain the characteristics of the domestic architecture of the

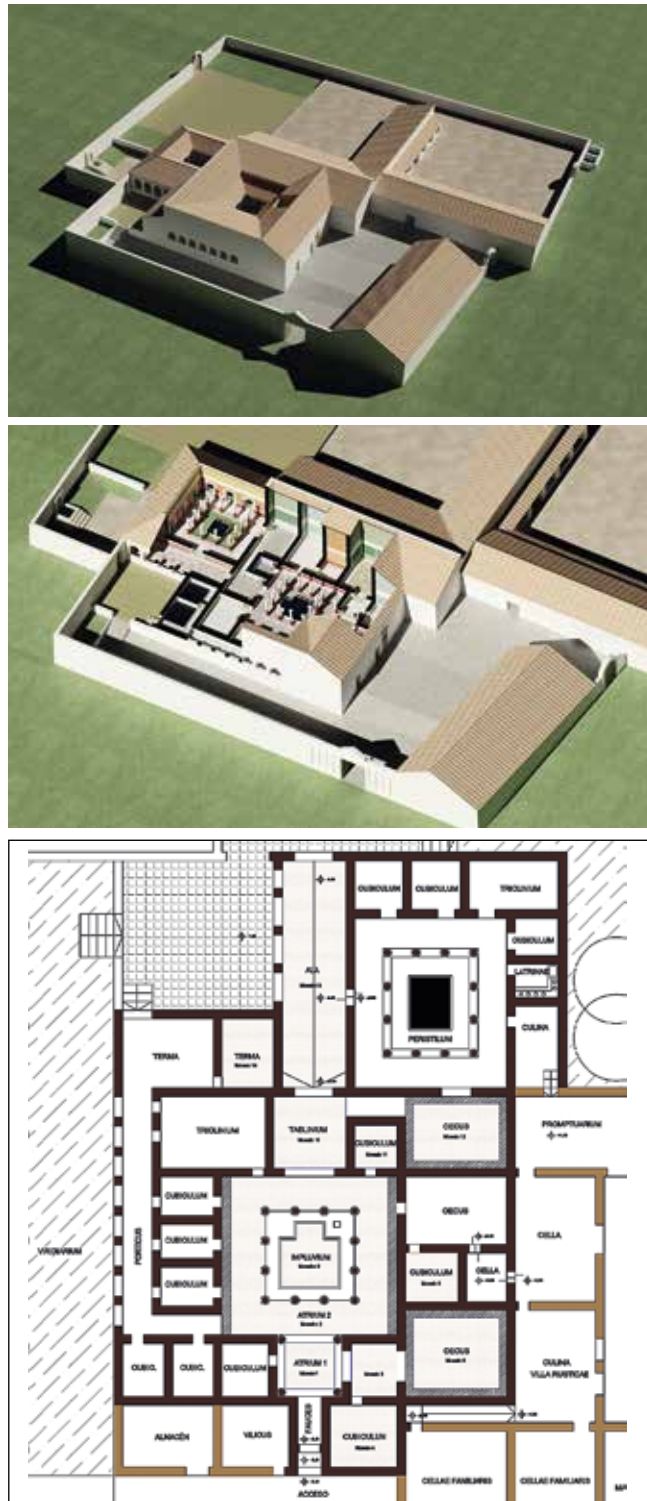


Fig. 5.
General views of the villa – above, and hypothetic distribution of the *pars urbana*.
Pavements with mosaics are marked – below



Fig. 6.
Anphoras for oil and wine and explanatory panel

archaeological site, the formal analysis to construe and understand the functionality of the structures and the syntactic analysis of the space to grasp the subjacent social significance.

The virtual reconstruction mimics the constructive materials found in the dig that are properly described in the corresponding excavation reports (Sierra 1985; Hoz 1987). Those reports also give important clues to the possible distribution of spaces and the way they are grouped in terraces following the slope of the terrain. Those clues were especially taken into account to obtain the hypothetical layout of the complex.

On the basis of the previous analysis, the model of the villa was organized in three zones following the alignments of the terraces found on the site. The first one corresponds to the *pars urbana*, the noble area where the *dominus* and his family lived, and the area dedicated to the thermal baths (*balnea*). The second one is related to the accommodation of the servants, slaves and all personnel who harvested the crops in the surrounding fields. The third area includes spaces for storage of farm equipment and stables. The final distribution is displayed in the figures (fig. 5).

2.2. Virtual musealization

Musealization of the model:

The virtual representation of the *domus* is fully visitable. The user, represented by his or her avatar, dressed as a Roman inhabitant of the *villa*, can walk freely throughout all the complex, enjoying not only the architecture of the building, but also the wall paintings, furniture, mosaics and other elements of material culture (*anphoras* for oil and wine, *tegulas*, oil lamps, etc) (fig. 6). The setting of the different spaces (*atria*, *peristila*, *lararium*, *triclinium*, *tablinium*, etc) helps interpret the daily life in such facilities. The main focus is the mosaic of



Fig. 7.
Room explaining the oil commerce from the villa

the “Judgment of Paris” since this piece is unique in Hispania, being one of the five known mosaic found in all the Roman Empire and depicting this theme (Blázquez 1985).

All notable elements in the virtual villa have explanatory panels written in Spanish and English (switchable) that give information about every specific topic. Some rooms act as containers of descriptive elements like maps (fig. 7), pictures and videos related to the activities that took place in the villa and the art of mosaic making.

Implementation and support for the interpretation center:

The virtual villa is implemented as a database in an OpenSim server, so it can be accessed through the Internet using any compatible viewer such as Singularity, Kokua or Imprudence. Anyway, a custom-configured viewer can download this project from the website of the virtual world.

Independently from the remote access, the virtual world is designed so that it can be used as a local simulation of the ancient house from within the interpretation center, with the help of a regular personal computer located in one of its exhibition rooms. This way, this virtual museum accomplishes several objectives of the center:

Depiction: The virtual world displays formal aspects and characteristics of the elements to interpret, their full shape, location and use in the villa, relative importance, etc.

Evocation: The virtual villa fosters the use of imagination to make the visitors feel themselves part of the ancient world, thus helping understand the key concepts and better grasp the information that is offered.

Experience: The visitor can perceive the villa and the mosaics located inside through a virtual, but vivid experience, feeling the relations between the spaces, contemplating the



Fig. 8.
Educational activities for remote users

elements displayed, and experiencing the visit to the virtual villa like he or she could do it in a real museum.

Last but not least, the multiuser enabled remote access brings the possibility to put distant visitors in touch, allowing them to meet one another in the virtual facility where both text and voice chats are available. This way, it is possible to organize such events as lectures, guided visits for remote groups of visitors (i.e. school groups) in the virtual villa, expert meetings, etc (fig. 8).

2. 3. Avatars and gamification

As it was mentioned above, users enter this world using avatars that can be chosen from a small variety of male and female, both adult and child, images. Those avatars dressed in Roman garments and wearing jewelry can be personalized for every user. This is made in order to reinforce the feeling of personal presence of the visitor in the virtual world.

There is a quiz game implemented in the virtual world, specially designed for young visitors. The player is to face a bas-relief sculpture of Medusa that asks him or her a question. The answer is easy to give if the visitor has paid enough attention to the information displayed all over the villa. If the player succeeds in answering the question, Medusa gives him (or her) an image of a golden apple like the one depicted in the “Judgment of Paris” mosaic (fig. 9).

3. Conclusions

Virtual worlds can be used as a very effective tool for the dissemination of the cultural goods of an interpretation center. Virtual replicas can not only be displayed but also put into context, allowing for a better understanding of their cultural meaning. Those virtual

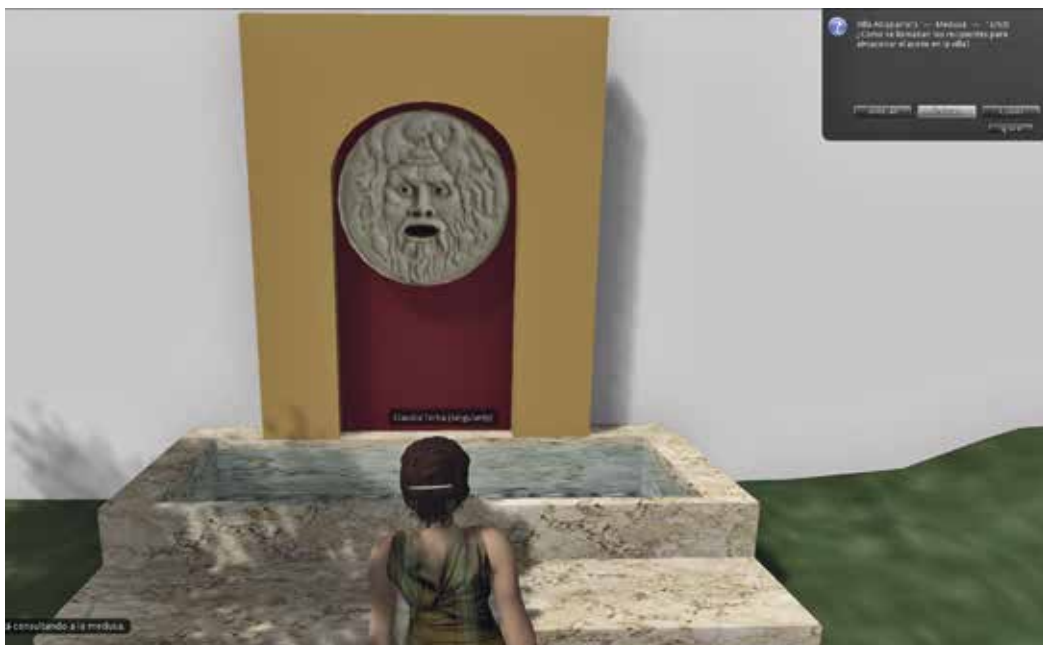


Fig. 9.
Visitor playing the quiz

environments can be used both as on-site simulation of historical reconstruction and also as a means for remote visits, drawing interest and attention of visitors from all over the world, thus reaching people which could probably never visit the real place. All of this makes virtual worlds a notable tool for enhancing the didactic capabilities of such centers.

References

Azkarate 2002

Azkarate A. *Arqueología de la arquitectura: definición disciplinar y nuevas perspectivas* // *Arqueología de la Arquitectura* 1. 2002. Pp. 7–10.

Barneche 2010

Barneche V. *Patrimonio histórico y metaversos. Estudio de caso de la recreación interactiva de la Torre de Hércules en Second Life* // *Virtual Archaeology Review*. Vol. 1.2. Pp. 59–62.

Barneche 2014

Barneche V. *Evaluating user experience in joint activities between schools and museums in virtual worlds* // *Universal Access in the Information Society*. Springer, 2014. Available: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10209-014-0367-y#> Accessed

Blázquez 1985

Blázquez J. *Mosaicos romanos del Campo de Villavidel (León) y de Casariche (Sevilla)* // *Archivo Español de Arqueología*. T III. Madrid : CSIC, 1985.

Forte 2008

Forte M. *La Villa di Livia. Un percorso di ricerca di archeologia virtuale*. Rome: L'Erma di Bretschneider, 2008.

Harrison 2009

Harrison R. *Excavating Second Life: cyber-archaeologies, heritage and virtual Communities* // *Journal of Material Culture* 14(1). 2009. Pp. 75–106.

Hoz 1987

Hoz A. *Informe de la segunda campaña de excavaciones en la villa romana de "El Alcaparral"* // *Anuario Arqueológico de Andalucía* 86. Vol. III. 1987.

Sequeira 2013

Sequeira L. *Virtual archaeology in Second Life and OpenSimulator* // *Journal for Virtual World Research*. Vol. 6. 2013. Available: <https://journals.tdl.org/jvwr/index.php/jvwr/article/view/7047/6310>. Accessed

Sierra 1985

Sierra J. *Memoria de la excavación de urgencia en El Alcaparral (Casariche, Sevilla), 1985–1987* // *Anuario Arqueológico de Andalucía* 58. 1985.

Steadman 1996

Steadman S. *Recent research in the archaeology of architecture: beyond the foundations* // *Journal of Archaeological Research*. Vol. 4.1. 1996. Pp. 51–93.

Р. Г. Подгорная, М. А. Васильев

ГБУК Псковской области «Археологический центр Псковской области», Россия

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ГИС «АРХЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПСКОВА» И «ОБЪЕКТЫ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ ПСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ»

Археологические исследования в Пскове ведутся на протяжении многих лет. Первые раскопки состоялись в 1912 году у Мстиславской башни. Многие годы основными инструментами для измерений и точной фиксации археологических объектов и артефактов были рулетка, нивелир и миллиметровая бумага. Стремительный рост цифровых технологий, их повсеместное внедрение привело к поэтапной замене привычных инструментов на электронные аналоги.

Многолетние раскопки, ведущиеся в Пскове, позволили получить достаточно полное представление о культурном слое, его мощности и сохранности на разных участках города (Лабутина 1981; Лабутина 1983). С помощью базы знаний можно прогнозировать объемы предстоящих археологических работ, вероятные хронологические рамки культурного слоя, сохранность археологических объектов и артефактов и т. д. По нашему мнению, в настоящее время имеются все необходимые условия для создания полноценной ГИС.

В 1981 году была проведена систематизация сведений о раскопках в Пскове с 1912 по 1979 годы по ряду параметров: год, место проведения работ, руководитель экспедиции, учреждение, проводившее работы, площадь исследования, мощность культурного слоя, место хранения коллекции, местонахождение отчёта и перечень основных публикаций (рис. 1).

К этому времени общая площадь, изученная в ходе археологических раскопок, была равна 2,2 га, что составляло чуть более 1 % от территории средневекового города.

В 1992–1994 годах в дополнение к текстовой части была разработана схема расположения раскопов в электронном виде (AutoCad) с привязкой к современной топооснове (Харлашов 2000). Создан dwg-файл, содержащий разнесённые по слоям данные топоосновы (городская координатная сетка, улицы, постройки) и раскопы (рис. 2).

В 1999–2001 годах впервые на археологическом материале была создана компьютерная модель первоначального рельефа г. Пскова (Яковлева 2001; Харлашов 2000). На основе более 800 точек в программе Serfer 6.0 была смоделирована поверхность, совмещённая затем с историческими планами и современной топоосновой в AutoCad.

В настоящее время работа по уточнению и дополнению модели продолжается. Полученные результаты используются для прогнозирования мощности и сохранности культурного слоя в ходе выполнения предпроектных работ. База данных о мощности культурного слоя насчитывает около 1500 единиц (рис. 3).

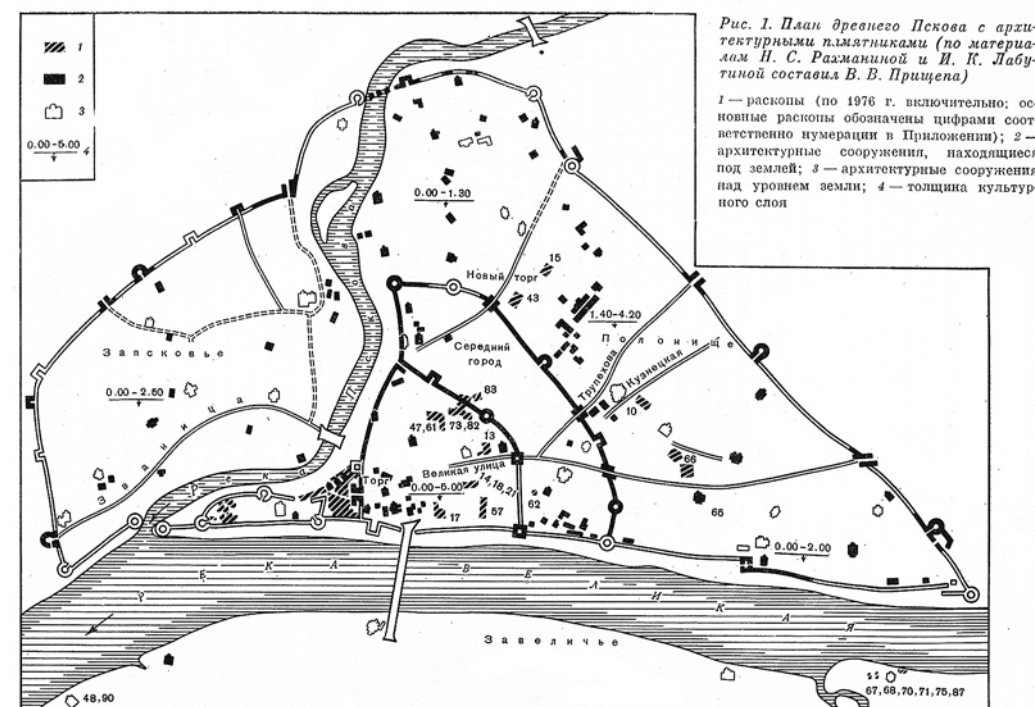


Рис. 1.
Схема расположения архитектурных объектов и археологических раскопов на территории г. Пскова в начале 80-х годов XX века

В 2001–2002 годах была начата работа над проектом РГНФ «Древности Псковской земли». Создание компьютерной карты-схемы и сводной таблицы археологических памятников Псковской области на основе данных мониторинга, картотеки, паспортов ОКН (исп. Б. Н. Харлашов; А. В. Михайлов).

Карта-схема выполнена в программе AutoCad на основании оцифрованной карты Псковской области с послойным наложением гидрологии, археологических объектов, населённых пунктов.

В 2003 году началось формирование цифрового архива отчётной документации: тексты, чертежи, альбомы иллюстраций (Харлашов 2003; Королёва и др. 2013). Установлен единый формат dwg для всей полевой чертёжной документации.

В 2010–2011 годах был реализован проект РГНФ «Археологическое изучение Пскова. Каталог раскопов и электронный архив 1912–2008 гг.» (Королёва, Подгорная 2010; Королёва и др. 2013).

В рамках реализации проекта коллективом авторов были подготовлены:

- уточнённый перечень археологических раскопов с 1912 по 2008 годы (по материалам архивов ИА РАН, древлехранилища псковского музея-заповедника, ПФ ФГУП «Институт реставрации памятников истории и культуры «Спецпроектреставрация», ГБУК «Археологический центр Псковской области»);
- уточнённая электронная карта месторасположения раскопов с включёнными обозначениями координатных сеток, делением на участки и т. п., в том числе

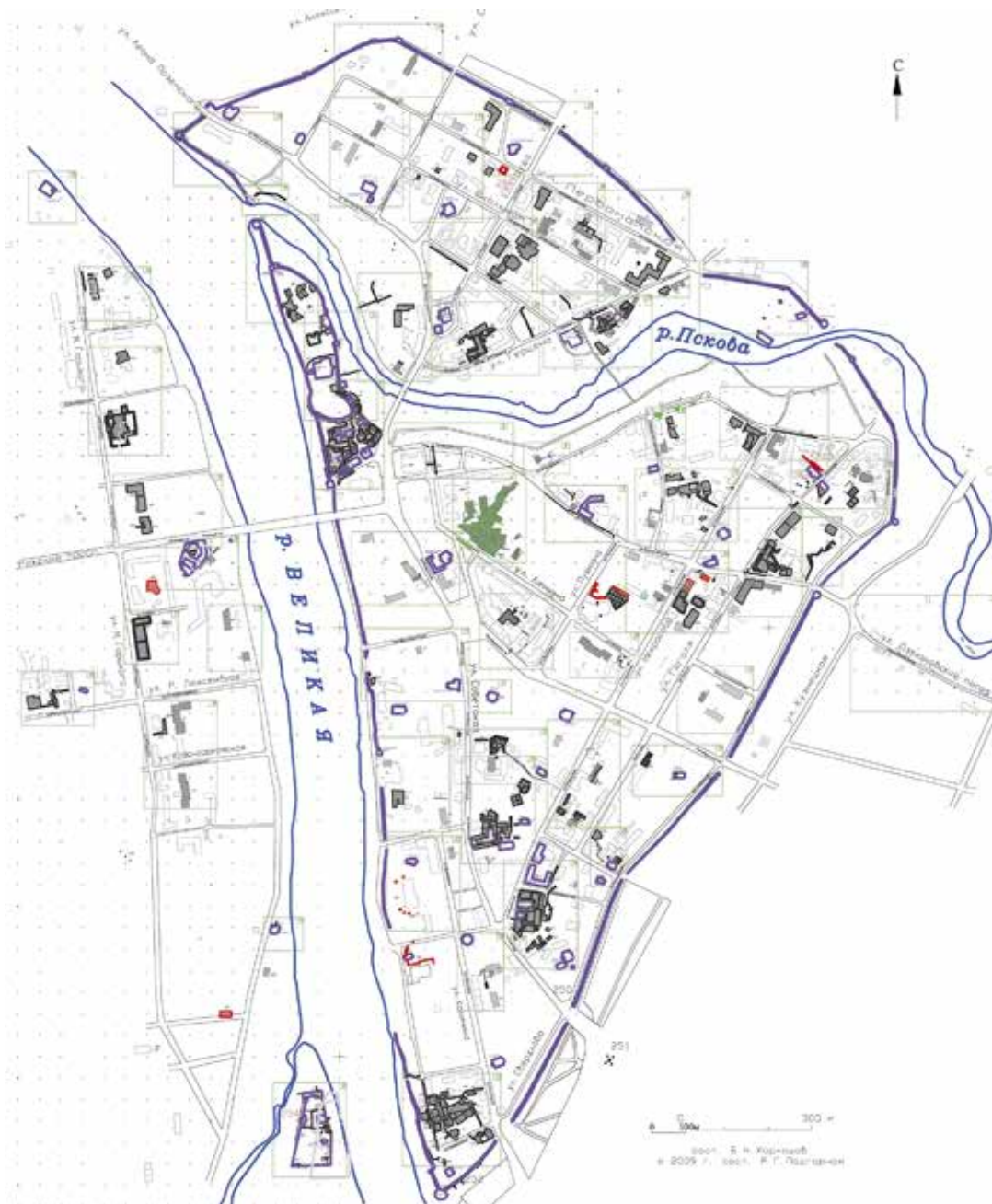


Рис. 2.
Современная «Схема расположения археологических раскопов в г. Пскове»
(актуальна для 2014 года)

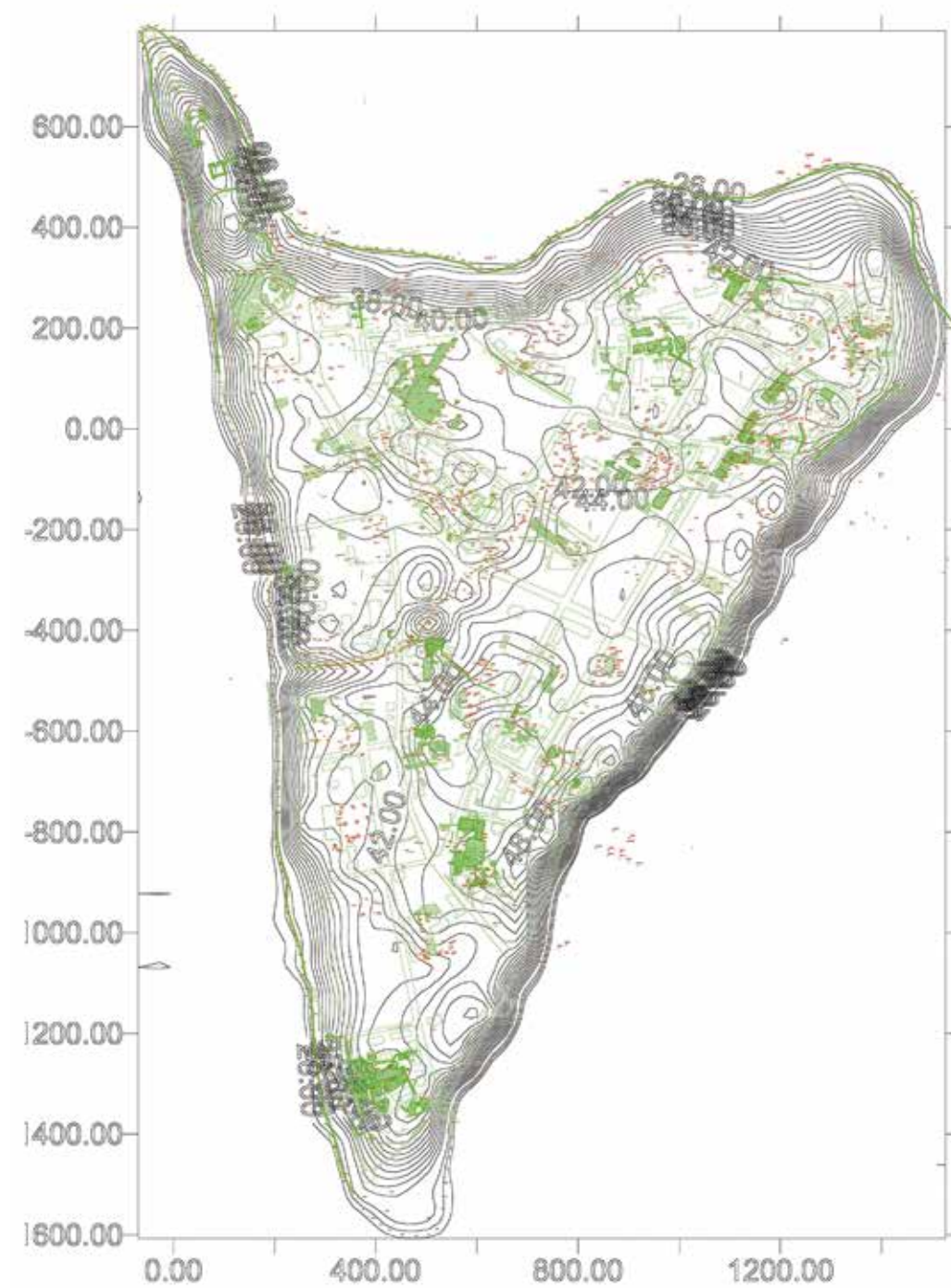


Рис. 3.
Модель палеорельефа средневекового Пскова на основании данных
археологии и геологического бурения



Рис. 19. Схема расположения археологических раскопов в г. Пскове (фрагмент).
 11 - 1955 г., ул. Некрасова, 36 (раскоп 2); 18 - 1967 г., ул. К. Маркса, 15; 46 - 1982 г., ул. Некрасова, 25; 61 - 1987 г., ул. Некрасова, 38 (Новоторговский I); 130 - 1995 г., ул. К. Маркса (шурфы); 139 - 1998 г., ул. К. Маркса, 31 (Новоторговский II); 204 - 2005 г., ул. Некрасова, 38/40 (Новоторговский 4); 218 - 2007 г. ул. Некрасова, 25 (Новоторговский 5); 233 - 2008 г. ул. Некрасова, 25 (Новоторговский VI-VII); 234 - 2008 г. ул. Некрасова, 25 (Новоторговский VIII);

Рис. 4.
 Пример представления графической информации в «Каталоге археологических раскопов г. Пскова»

с корректировкой месторасположения и атрибуции ряда раскопов, выполненных до конца 80-х годов XX века;

- подготовка отдельных локальных ситуационных схем (55 шт.) для выделенных участков средневекового города (рис. 4);
- текстовый каталог с отдельным описанием каждого раскопа (учётной карточкой раскопа);
- электронный архив отчётной документации;
- электронный архив основных публикаций о результатах археологических исследований.

В 2012 году продолжены работы в рамках реализации проекта приграничного сотрудничества Эстония-Латвия-Россия «Археология. Власть. Общество». Итогом проекта станет совместная БД и электронная карта по памятникам археологии, включающая в себя информацию по пограничным районам Псковской области, Эстонии и Латвии. БД постоянно пополняется в ходе мониторингов и обследований (рис. 5, 6).

Также в 2012 году на базе ГБУК ПО АЦПО была создана Лаборатория цифровой археологии (в рамках реализации Проекта Всемирного банка «Сохранение

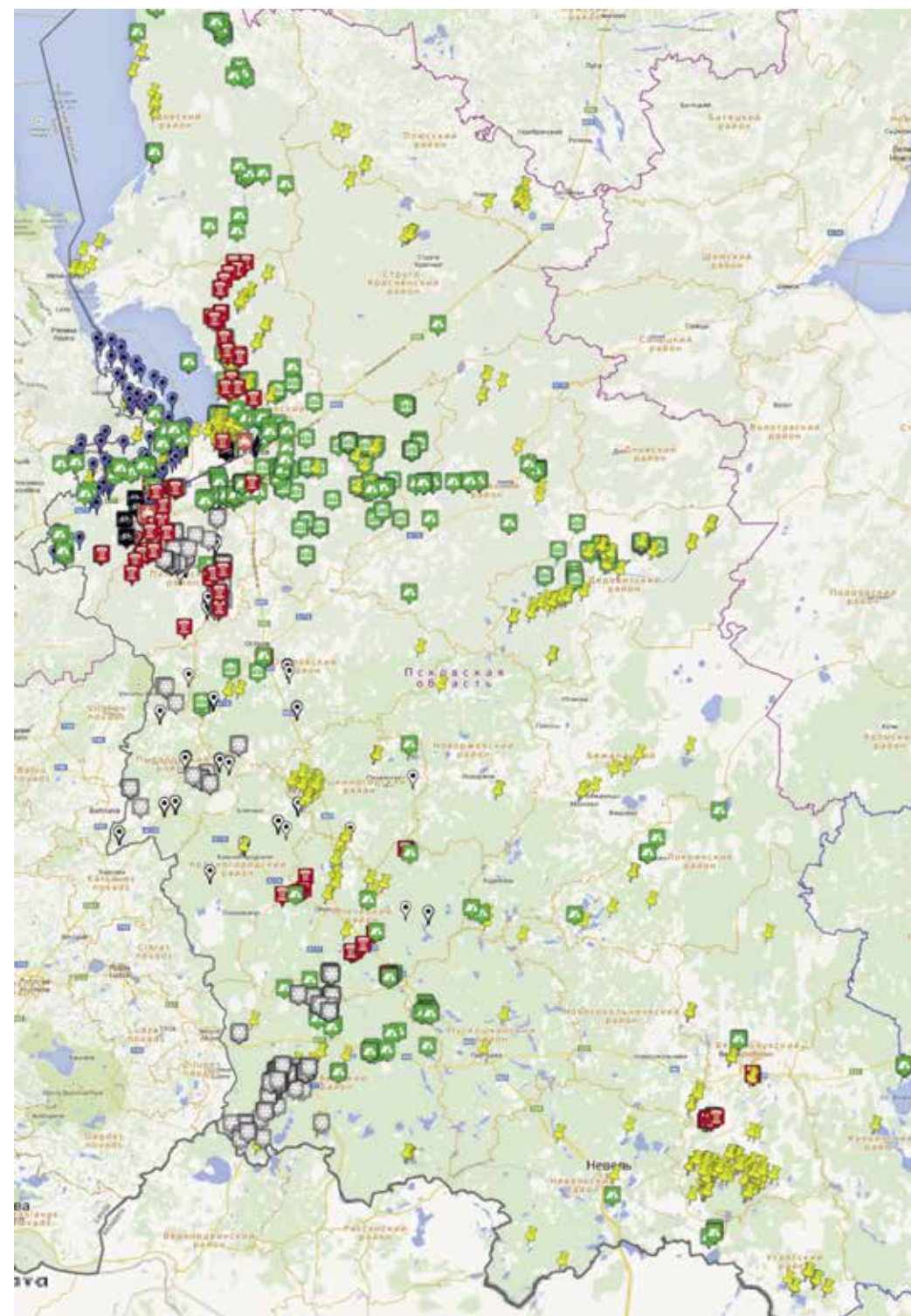


Рис. 5.
 Электронная карта месторасположения археологических памятников на территории Псковской области (с использованием SASPlanet)

Рис. 6.
Сводная таблица памятников археологии Псковской области (в формате Excel)

и использование культурного наследия РФ», подпроекта «Лаборатория цифровой археологии «Прикосновение к истории»).

Несмотря на обилие материалов и большой объём уже проделанной работы информация пока находится в нескольких слабо связанных блоках:

1. Подробная **схема городских раскопов** (более 400 единиц), с привязкой к современной топооснове и историческим планам в формате dwg.

2. **Сводная таблица**, содержащая информацию из Учётных карточек раскопов (номер на Схеме размещения раскопов в г. Пскове; номер по каталогу (поскольку в ходе корректировки схемы количество раскопов существенно изменилось, а кроме того, на предыдущей схеме под одним номером могли фигурировать несколько объектов, было принято решение вести двойную нумерацию: по Схеме и по Каталогу)); год/годы проведения работ; шифр раскопа; современный адрес с указанием улиц и номеров домов; руководитель работ (держатель Открытого листа); площадь исследований; организация, выполняющая археологические работы; цель проведения работ; историко-топографическая характеристика изучаемого участка; мощность антропогенных отложений (в том числе мощность культурного слоя), значение репера; характеристика культурного слоя; датировка культурных отложений; характеристика материковых отложений; основные результаты работ; место хранения археологической коллекции, её состав, датировка и количество единиц хранения; место хранения отчётной документации (в том числе указание автора, полного названия отчёта, архивный шифр, комплектность); публикации по результатам исследования.

3. **Модель первоначального рельефа** г. Пскова и БД по точкам геологического бурения.

4. **Электронный архив** публикаций и отчётов о раскопках.

5. **БД археологических находок.**

6. **Сводная таблица археологических памятников** Псковской области (содержит название, привязку, тип памятника, датировку, наличие учётной документации, описание, фото и т. д.)

7. **Сводная карта** в SAS planet, содержащая информацию о памятниках археологии Псковской области.

В качестве важнейшего направления работы Лаборатории цифровой археологии рассматриваются варианты связывания этих разрозненных блоков информации в единое целое, что в конечном итоге должно привести к созданию полноценной ГИС.

Литература

Королёва, Подгорная 2010

Королёва Э. В., Подгорная Р. Г. Методические принципы разработки информационной системы «Археологическое изучение Пскова» // АИППЗ: Заседание 55. Псков, 2010.

Королёва и др. 2013

Королёва Э. В., Деркач В. А., Подгорная Р. Г., Романовский А. Б. Археологическое изучение Пскова: Каталог раскопов и электронный архив (1912–2008 гг.) // АИППЗ: Заседание 58. Псков, 2013.

Лабутина 1981

Лабутина И. К. Итоги изучения культурного слоя Пскова // КСИА. 1981. № 164. С. 24–30.

Лабутина 1983

Лабутина И. К. Культурный слой Пскова // Археологическое изучение Пскова. М.: АН СССР, Ин-т археологии, 1983. С. 7–45.

Харлашов 2000

Харлашов Б. Н. Псковский государственный научно-исследовательский археологический центр: Опыт организации археол. исслед. в условиях самофинансирования 1991–1996 гг. // АИППЗ. 1996–1999, 2000. С. 82–90.

Харлашов 2003

Харлашов Б. Н. План Псковской крепости 1740 г. (опыт адаптации к современной топооснове // Псков. Науч.-практич., ист.-краевед. журнал. 2003. Вып. 18. С. 93–103.

Яковлева 2001

Яковлева Е. А. Модель первоначального рельефа Пскова и летописные топонимы Среднего города // АИППЗ. Псков, 2001. С. 86–96.

М. В. Вавулин,
О. В. Зайцева,
А. А. Пушкарёв

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

ТРЕХМЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРАБЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ КОЧА

1. Введение

Коч – парусно-гребное судно допетровского времени, приспособленное к плаванию в тяжёлых арктических условиях (Боярский и др. 2000). Очевидно, что ни один коч не сохранился. Изготовление точных инженерных чертежей в допетровскую эпоху не практиковалось, а дошедшие до нашего времени изображения коча не позволяют сделать полную реконструкцию судна. Уникальными источниками для его воспроизведения являются подлинные корабельные детали, обнаруженные во время археологических исследований первого русского заполярного города Сибири – Мангазеи (Визгалов, Пархимович 2007. С. 94–95; Кухтерин 2011).

В 2014 году ООО НПО «Северная археология-1» (Нефтеюганск) совместно с Лабораторией междисциплинарных археологических исследований «Артефакт» Томского государственного университета начали работы по трёхмерному сканированию деталей коча. Конечной целью проекта являлась цифровая 3D-реконструкция судна.

Корабельные детали весьма объемны (до 7 м в длину) и тяжело поддаются реставрации и музейному экспонированию. Более того, все усилия по производству раскопок в условиях мерзлоты и транспортировке обнаруженных деталей коча на «Большую землю» могут оказаться напрасными в связи с постоянно ухудшающейся сохранностью извлечённой из археологического слоя древесины. Лазерное сканирование и создание цифровых моделей деталей сохранит для потомков эти уникальные вещественные источники в виртуальном пространстве.

2. Оборудование и программное обеспечение

Для работы использовался ручной оптический сканер GoScan 3D канадской компании Creaform. Он позволяет достаточно быстро сканировать большие объекты с максимальным разрешением 0,5 мм. Определяющим фактором при выборе этого сканера являлась возможность его ориентации в пространстве по позиционным меткам в режиме реального времени, что позволяло отсканировать каждую деталь за одну сессию. На выходе получалась единая полигональная сеть всего объекта, что значительно уменьшало время постобработки. Однако, в отличие от аналогов, этот сканер не способен захватывать текстуры. Поэтому текстурирование готовых моделей выделялось в отдельный процесс. Использовался фотоаппарат Nikon D700 с объективом Nikkor 24–70 мм 1:2.8G. Программное обеспечение: Creaform VXelements, Agisoft Photoscan, Geomagic Wrap, Autodesk 3D studio MAX.

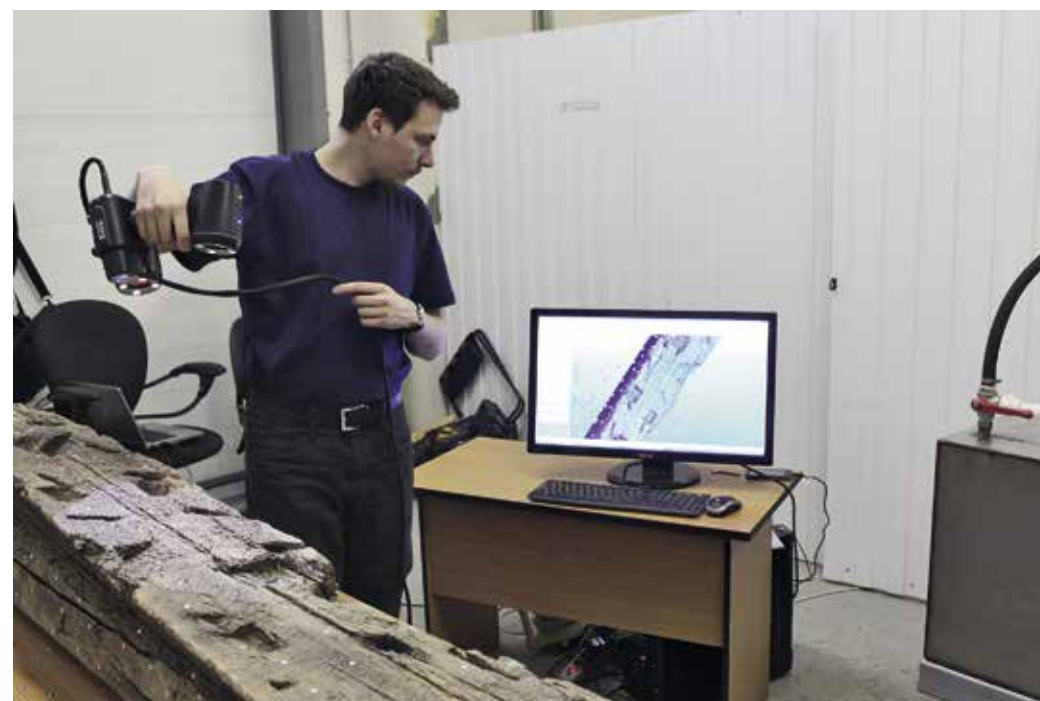


Рис. 1
Процесс сканирования корабельных деталей

3. Методика получения 3D-моделей

3.1. Процесс трёхмерного сканирования

В случае с корабельными деталями необходимо было отсканировать автономные объекты без окружения со всех сторон, чтобы соединить итоговую модель в единую замкнутую полигональную сеть. При этом корабельные детали имели достаточно мелкие конструктивные элементы (1–5 см), для чего требовалось сканирование в высоком качестве.

Перед началом сканирования каждый объект располагался на подставках высотой 0,5–0,7 м со свободными участками около 1 м с каждой стороны. Затем на боковые и торцевые 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. Это позволяло избежать накопления погрешностей. 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 была отсканирована поверхность и положение меток) в центральной части объекта (рис. 1).

Сканирование объёмных объектов с максимальным разрешением 0,5 мм не синхронизировалось с компьютером по скорости передачи данных. Это создавало постоянную задержку в отображении процесса и приводило к потере ориентировки сканера в пространстве и, как следствие, значительно увеличивало время сканирования.

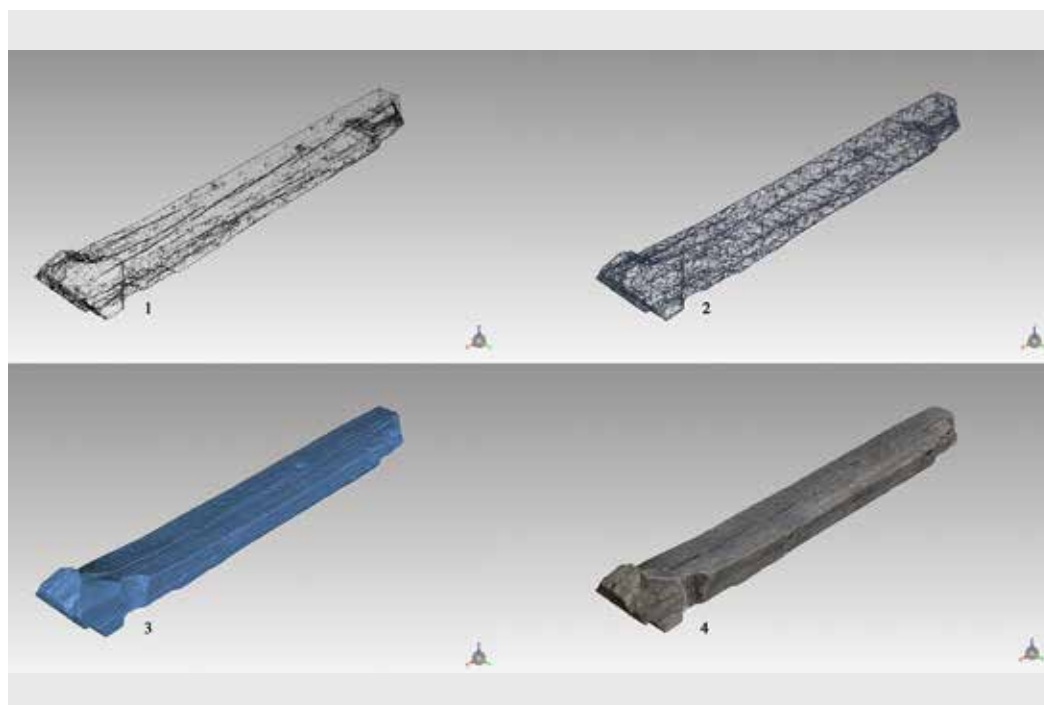


Рис. 2
Процесс создания модели
1 – Облако точек
2 – Триангуляция сети
3 – Полигональная модель
4 – Текстурированная модель

Вне зависимости от разрешения, заданного в начале сканирования, используемая программа передачи данных VXelements предварительно сохраняла всю последовательность полученных с камер кадров, а уже затем, на их основе производила построение полигональной сети с заданным разрешением. Таким образом, первый этап сканирования производился с разрешением 5 мм, что значительно ускорило процесс. Дальнейший пересчёт модели на более высокое разрешение осуществлялся в лабораторных условиях. В качестве рабочего было выбрано разрешение в 1 мм.

3.2. Обработка моделей

Полученная модель импортировалась в программу Geomagic Wrap, в которой удалялись ненужные полигоны (шумы, подставки), «зашивались» отверстия. В тех местах, где бы это требовалось, например, в сквозных отверстиях под нагели, поверхность достраивалась вручную (рис. 2).

3.3. Наложение текстур

Для получения фотореалистичных моделей необходимо наложение качественных текстур. В нашем случае объекты представляли собой длинные детали и, следовательно, в случае фотографирования их одним кадром (по ширине кадра) детально рассмотреть определённые участки было невозможно – недостаточно разрешение

фотоаппарата (4265 × 2832 точек). Фотографирование каждой стороны производилось серией кадров (10–15 шт.), так, чтобы на каждом кадре объект занимал не менее 80 % площади с постепенным смещением. Соседние снимки делались с наложением 30–50 %.

Полученные фотоснимки загружались в фотограмметрическую программу Agisoft Photoscan, где обрабатывались, фактически создавая плоскость со спроецированным на неё изображением. Текстуры этой «трёхмерной модели» сохранялись как растровое изображение. Таким образом, получалось изображение, «сшитое» из множества фотографий.

Вместе со сканированной моделью, изображения загружались в программу Geomagic Wrap, где на модель, минимум по четырём общим парам точек, а обычно по 20–30 парам точек, проецировалось растровое изображение текстуры.

3.4. Результаты оцифровки деталей.

В итоге было отсканировано 38 корабельных деталей. Из них 36 деталей удалось перевести в качественные трёхмерные модели, на 34 детали были наложены фототекстуры. Из двух отсканированных деталей не получилось создать цельные трёхмерные модели по причине их деформации при изменении положения для двустороннего сканирования. Две детали остались нетекстурированными по причине нарушения методики фотографирования деталей (методика разрабатывалась на месте, во время сканирования, а осуществить проверку результатов стало возможным лишь в лабораторных условиях).

4. Методика реконструкции киля корабля

Первым шагом в создании виртуальной модели целого судна стало создание модели киля коча. В 2008 году на городище Мангазея была обнаружена постройка, сложенная из судового набора, в том числе из четырёх фрагментов киля. Для удобства транспортировки два фрагмента распилили пополам для транспортировки. Эти 6 деталей отсканировали для реконструкции киля. После выставления деталей в нужных позициях получилась следующая картина: носовой и кормовой куски киля соединились между собой узкими концами; третий и четвёртый фрагменты образовали одну расколотую часть киля, являющуюся продолжением кормового киля.

4.1. Соединение фрагментов киля

Для создания единого полигонального объекта все шесть частей необходимо было соединить в единую сеть. В отличие от распиленных частей, соединение кормового и носового фрагментов киля было сопряжено с рядом сложностей: отсутствовали уступ на кормовой части киля на участке в 15 см и боковой фрагмент носовой части на расстоянии 40 см. Для соединения подобных сетей необходимо было удалить все полигоны, образующие поверхность, появившуюся в результате вторичного использования или естественного разрушения, после чего отверстия в деталях необходимо было соединить друг с другом мостами полигонов вдоль основных перегибов поверхностей и заполнить, образуя изначально отсутствующую геометрию.

Оставшиеся две детали необходимо было сначала соединить между собой, а затем присоединить к кормовой части киля. В первом соединении основную сложность составляло большое перекрытие моделей, а также отсутствие значительной части изначальной поверхности со сложной геометрической формой, во втором – достаточно большое расстояние между деталями – около 20 см пустого пространства. Данные соединения производились по той же методике, но требовали кропотливой



Рис. 3
Реконструкция кия

работы по обработке сети, а также выстраивания временных вспомогательных полигональных мостов. В результате получился единый цельный объект с достроенной геометрией.

4.2. Обработка следов вторичного использования и естественного разрушения

На полученной модели присутствовали следы вторичной обработки, оставшиеся на деталях после использования их в конструкции жилища. Они представляли собой 11 выемок шириной от 10 до 50 см и глубиной до 15 см, расположенные на всём протяжении кия по обеим его сторонам. От этих следов было несложно избавиться тем же методом, который использовался при соединении деталей в одну – удалением полигонов поверхности вторичного использования, выстраиванием мостов вдоль основных изгибов поверхности и заполнением полученных прямоугольных отверстий. Сложнее дело обстояло с недостающим большим куском на нижней поверхности носового кия, протянувшимся от конца носовой части вглубь на расстояние 1,8 м. Кроме того, с этой же стороны верхняя часть кия была сильно повреждена, и отсутствовал боковой край. В данном случае, применить описанный выше метод не представлялось возможным, так как отсутствующие элементы находились на конце крайнего куска кия, что не позволяло протянуть мосты до продолжающейся за лакуной целой части. Решить эту проблему удалось дублированием и зеркальным отражением целого края кия на этой протяжённости с присоединением его к общей сети кия после предварительного удаления перекрытия.

4.3. Обработка деформации дерева

После всех построений удалось восстановить целый киль, без следов вторичного использования. Однако вид с торца позволял выявить значительное отклонение, около 9 градусов между горизонтальными плоскостями двух концов. По всей видимости, это естественная деформация дерева вследствие его высыхания. Для устранения этого дефекта модель импортировалась в программу 3D studio MAX, где существуют инструменты по точечному редактированию сети модели.

4.4. Результат реконструкции

В результате мы получили цельную модель кия (рис. 3). Данная реконструкция является предварительной. Полная реконструкция корабля возможна только после оцифровки всех деталей и при непосредственном участии специалистов по судомоделированию.

5. Заключение

В ближайшем будущем на основе данных сканирования будет создана база данных трёхмерных моделей корабельных деталей из раскопок на городище Мангазея. В базу будут включены около 130 моделей судовых деталей и их технические описания.

Коч – это своеобразный культурный символ освоения приполярного бассейна. На основе трёхмерной виртуальной модели могут создаваться реплики коча для подготовки эксперимента по плаванию на воссозданном судне. Современные технологии 3D-печати позволят создать уменьшенные модели кочей и внедрить в музейную педагогику занятия по историческому судомоделированию. Из созданных на 3D-принтере уменьшенных моделей подлинных корабельных деталей дети смогут самостоятельно собрать целое судно, попутно овладев специфической судовой терминологией.

6. Благодарности

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.В.25.31.0009).

Литература

Боярский и др. 2000

Боярский П. В., Визгалов Г. П., Ивасько Л. В., Кардаш О. В., Сумин В. В., Шульгин П. М. Коч – русское полярное судно: проблемы исследования и реконструкции. М. : Институт Наследия, 2000.

Визгалов, Пархимович 2007

Визгалов Г. П., Пархимович С. Г. Мангазея – первый русский город в Сибирском Заполярье (по материалам раскопок 2001–2004 годов). Нефтеюганск; Екатеринбург : Баско, 2007.

Кухтерин 2011

Кухтерин С. А. Традиционное северорусское судно – коч. Проблемы изучения и реконструкции. Реконструкция по материалам археологических исследований на Мангазейском городище 2001 – 2009 гг. // Культура русских в археологических исследованиях: междисциплинарные методы и технологии. Омск : Омский институт (филиал) РГТЭУ, 2011. С. 206–213.

А. В. Леонов
ИИЕТ РАН, Россия

3D-ДОКУМЕНТЫ В МУЗЕЙНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ: ВИРТУАЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ И ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ

Развитие технических средств фиксации пространственной информации об объектах привело к появлению нового типа научно-технической документации – 3D-документа (Леонов, Батулин 2013). 3D-документ – это особым образом организованная информация, предназначенная для представления пользователю трёхмерного визуального образа (3D-модели) объекта или процесса, а также разнообразной дополнительной информации, связанной с этим визуальным образом. Цифровая 3D-модель может содержать информацию о геометрии (топологии) и пространственной ориентации объекта, его внешнем виде, внутренней структуре (элементах, связях), особенностях материалов, динамике во времени и др. В 3D-документе пространственная информация о геометрии и структуре объекта хранится в некоторой трёхмерной системе координат, связанной с объектом. В этом состоит качественное отличие 3D-документа от рисунков, схем, чертежей, фото- и кинодокументов, которые сохраняют двумерные изображения объекта.

Простейшим примером 3D-документа является модель в виде трёхмерного облака точек, полученная в результате лазерного сканирования объекта (point cloud). На основе этого облака точек может быть построена трёхмерная полигональная модель объекта (mesh), трёхмерная твердотельная модель (solid). Также 3D-документ может быть создан при помощи методов фотограмметрии (построение 3D-модели объекта по его двумерным изображениям с разных ракурсов), томографии (построение 3D-модели внутренней структуры объекта по его послойным сечениям), в результате 3D-моделирования по чертежам и др.

Количество цифровых 3D-моделей реальных или исторических объектов, создаваемых во всём мире, постоянно растёт. В том числе появляется всё больше 3D-моделей рукотворных и природных объектов, представляющих общественную ценность (от памятников культуры и природы до иных видов национального или мирового достояния). Такие 3D-модели представляют собой не только новый тип документа, сохраняющего информацию об объекте, но и новый тип музейного экспоната, который может (и должен) демонстрироваться широкой публике.

Особенно активно виртуальные 3D-модели используются в сфере виртуальной археологии и исторической архитектурной реконструкции. Общее число 3D-моделей археологических объектов на сегодняшний день измеряется тысячами (Bawa 2010; Бородин, Жеребятёв 2012). Например, широко известен проект создания виртуальной 3D-модели античного Рима "Rome Reborn" (<http://romereborn.frischerconsulting.com/>). В 2012 году Государственный Эрмитаж провёл первую в России международную конференцию по виртуальной археологии, которая собрала десятки докладов в сфере виртуального моделирования и реконструкции (Виртуальная археология 2013).

Демонстрация виртуальной 3D-модели позволяет показать в музейной экспозиции:

1) объекты большого масштаба (башни, мосты, крепости, подземные сооружения, городскую застройку и т.п.);

2) утраченные или ныне не существующие объекты (археологическая реконструкция, историческая архитектурная реконструкция);

3) территориально удалённые и труднодоступные объекты;

4) территориально разнесённые объекты (например, экспонаты из коллекций разных музеев);

5) ценные экспонаты или объекты, находящиеся под угрозой разрушения (оригиналы которых недоступны широкой публике).

Трёхмерная модель, снабжённая соответствующим программным инструментарием, позволяет пользователю самостоятельно осматривать и изучать объект, включая его внешний вид и внутреннее устройство, «путешествовать» по виртуальной модели. «Геймификация» (Marczewski 2012) процесса ознакомления с объектом в музейной экспозиции способна существенно повысить заинтересованность пользователя, особенно среди молодёжной и детской аудитории. 3D-документ может использоваться не только для демонстрации широкой публике образа объекта, но и для анализа объекта специалистами, а также для образовательных приложений.

Важность применения новых технологий формирования и воспроизведения виртуальных образов для развития музейной деятельности признана на государственном уровне. Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 года № 597 «О мероприятиях по реализации государственной социальной политики» Правительству поручено создать к 2018 году 27 виртуальных музеев. Весной 2014 года Министерством культуры Российской Федерации были разработаны рекомендации по созданию виртуальных музеев. В этих рекомендациях дано следующее определение: «Виртуальный музей – интерактивный мультимедийный программный продукт, представляющий музейные коллекции в электронном виде» (Технические рекомендации 2014. С. 5). К сожалению, такое определение ограничивает сферу применения виртуального музея лишь демонстрацией электронных образов музейных экспонатов. В то же время виртуальная форма представления может широко применяться для объектов, которые музейными экспонатами не являются. К их числу относятся, например, археологические памятники, объекты индустриального наследия, образы несуществующих объектов (виртуальная реконструкция), визуализация процессов и явлений.

Для представления 3D-документов широкой публике могут применяться два подхода: индивидуализированный и массовый.

Первый подход (индивидуализированный) предполагает использование стационарного или мобильного программно-аппаратного комплекса, как правило, с большим экраном, зачастую с поддержкой специфических функций отображения (например, стерео) или специфических функций взаимодействия (сенсорные экраны, манипуляторы). Такой комплекс может быть установлен, например, в музее в качестве элемента экспозиции. При этом может подразумеваться либо непосредственное взаимодействие посетителя с данным комплексом, либо наличие оператора (сотрудника музея), осуществляющего демонстрацию. Программное обеспечение для демонстрации 3D-документов в этом случае разрабатывается с учётом индивидуальных технических особенностей используемого оборудования и не может быть перенесено на другой аппаратный комплекс без значительной переработки. Примеры реализации таких систем можно найти во многих крупных зарубежных музеях.

Второй подход (массовый) предполагает создание автономного программного продукта, который можно установить на пользовательском компьютере, либо веб-приложения, которое можно просматривать с использованием веб-браузера. В обоих случаях предполагается самостоятельное взаимодействие пользователя с предлагаемым

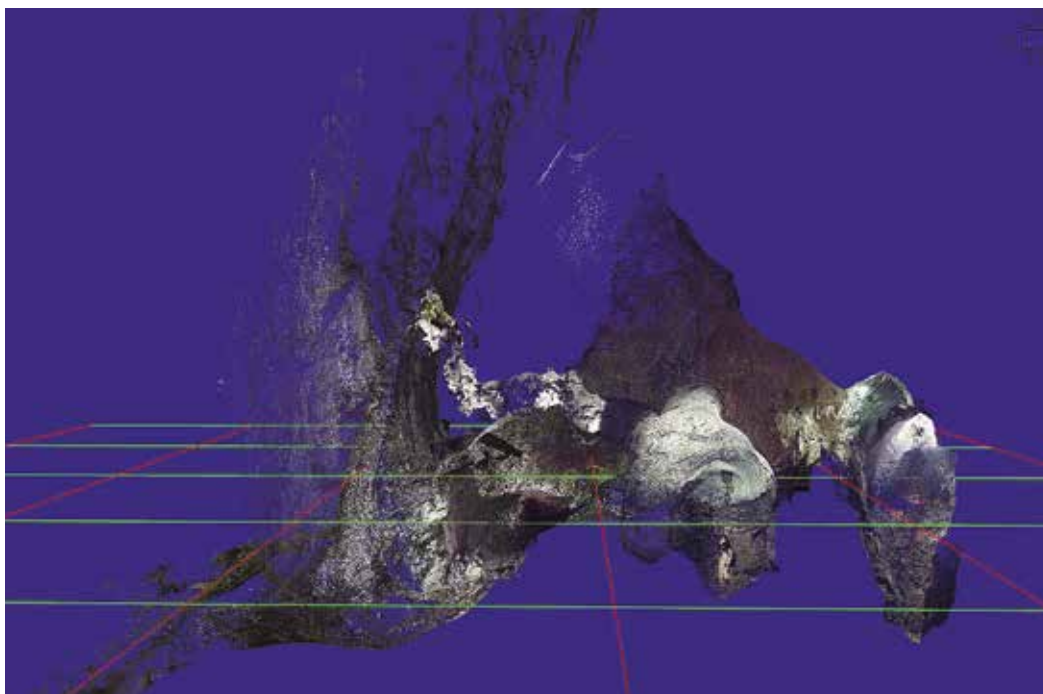


Рис. 1.
Точечная 3D-модель Денисовой пещеры. Показана координатная сетка с шагом 10 м

программным продуктом. Реализация второго подхода долгие годы сдерживалась из-за объективных трудностей. К ним относятся, прежде всего, сложность разработки программного обеспечения для работы с 3D-документами, рассчитанного на массового пользователя, и отсутствие единого стандарта представления 3D-моделей для веб-браузеров. По-видимому, первой масштабной реализацией второго подхода стал проект «Smithsonian X 3D» Смитсоновского института (США) (<https://3d.si.edu>), представленный широкой публике в конце 2013 года. Просмотр и взаимодействие с 3D-моделями, а также доступ к связанной с ними информации, осуществляется через специальный плагин для веб-браузера на основе WebGL, разработанный компанией Autodesk.

Оба подхода к представлению 3D-документов широкой публике могут успешно применяться для задач виртуальных музеев. Но при этом необходимо понимать, что разработка универсального программного кода, который можно было бы использовать для всех вариантов представления, очень сложна. Значительно проще на основе одной и той же 3D-модели и связанного с ней массива информации разрабатывать разные пользовательские приложения, предназначенные для разных способов представления.

Например, в 2012 году нами был выполнен проект по созданию виртуальной 3D-модели Денисовой пещеры на Алтае, а также программного обеспечения для интерактивной стереоскопической визуализации этой модели и дополнительной информации (Леонов и др. 2014). Денисова пещера на Алтае – уникальный природный и археологический памятник мирового значения. Регулярные раскопки здесь ведутся с 1982 года, выявлено более 20 культурных слоёв, собрано более 80 000 экспонатов. Находки, сде-

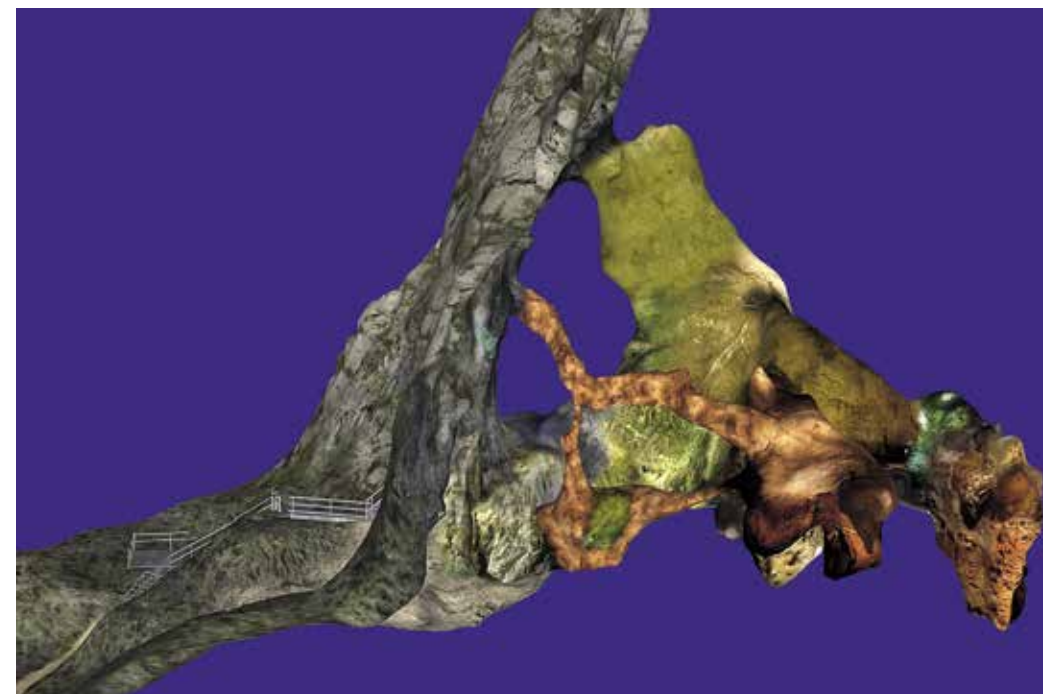


Рис. 2.
Текстурированная полигональная 3D-модель Денисовой пещеры.
Общий вид

ланные российскими археологами в Денисовой пещере в 2008 году, привели к открытию новой эволюционной ветви в развитии человека (Krause et al. 2010).

В августе 2012 года было выполнено лазерное сканирование и детальная фотосъёмка пещеры. Было сделано 37 сканерных станций, полное облако точек содержит около 50 млн точек (рис. 1). По результатам лазерного сканирования и фотосъёмки была создана текстурированная полигональная модель пещеры (около 90 тыс. полигонов). Разрешение текстуры составляет для разных участков от 30 до 100 тыс. пикселей на 1 кв. м поверхности модели. Таким образом, была создана детальная 3D-модель пещеры, которая фиксирует её геометрию и внешний вид с высокой точностью (рис. 2–4). Было также проведено лазерное сканирование, фотографирование и 3D-моделирование образцов находок, сделанных в пещере (каменных орудий).

Созданная 3D-модель пещеры была привязана к археологической системе координат, используемой для пространственной привязки находок. Таким образом, была обеспечена возможность сопоставления созданной 3D-модели с археологическими схемами, и непосредственного переноса массива имеющихся археологических данных в виртуальное пространство 3D-модели.

Для визуализации созданной 3D-модели пещеры была создана интерактивная 3D-презентация (программное обеспечение) (рис. 5). Презентация обеспечивает визуализацию облака точек, 3D-модели пещеры и моделей находок, пространственного расположения находок в различных археологических горизонтах. Кроме того, поддерживается визуализация дополнительных данных: направлений на стороны света, осей, сетки и положения реперов археологической системы координат. Поддержана



Рис. 3.
Текстурированная полигональная 3D-модель Денисовой пещеры.
Центральный зал



Рис. 4.
Текстурированная полигональная 3D-модель Денисовой пещеры.
Восточная галерея

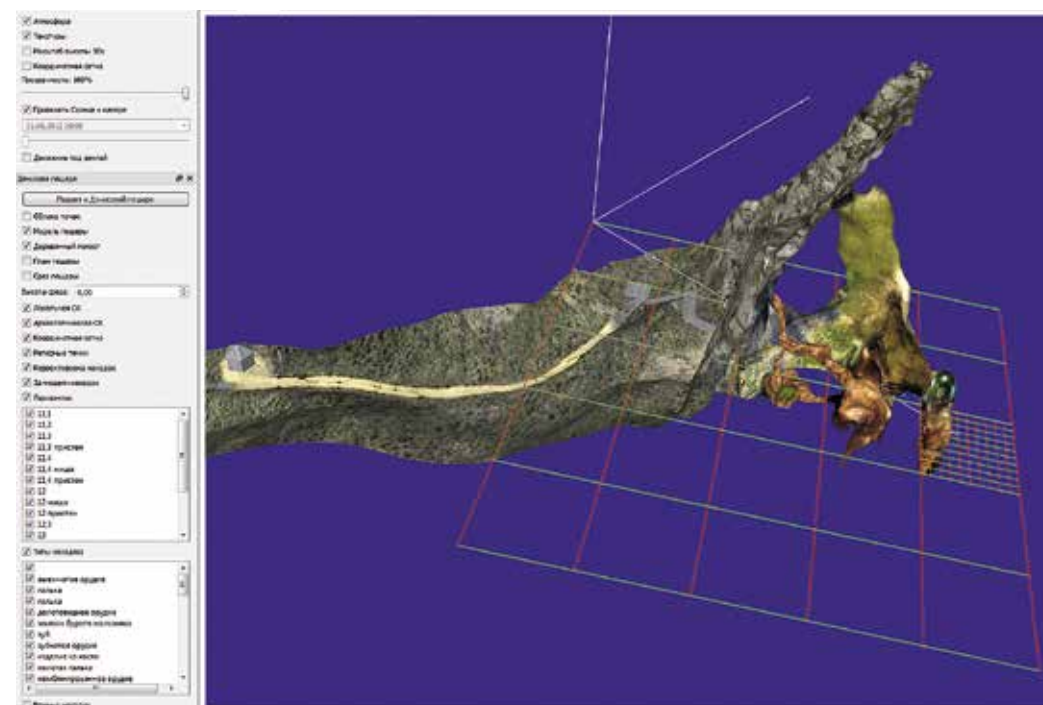
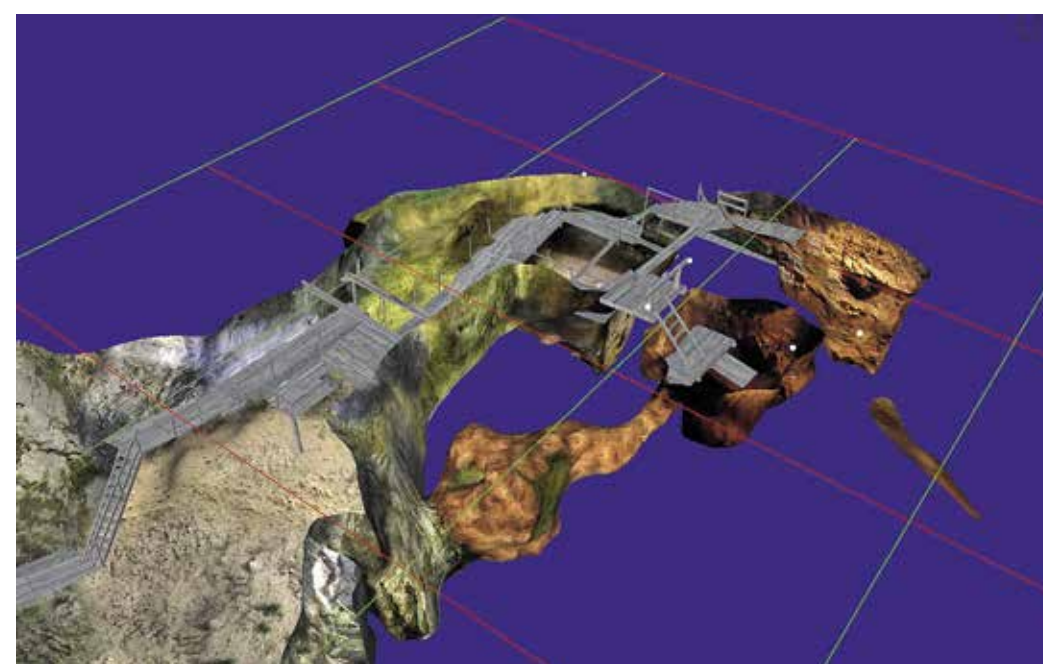


Рис. 5.
Интерфейс программного обеспечения: просмотр 3D-модели
Денисовой пещеры с наложенной координатной сеткой
Рис. 6.
Горизонтальный срез 3D-модели Денисовой пещеры на уровне 0 м



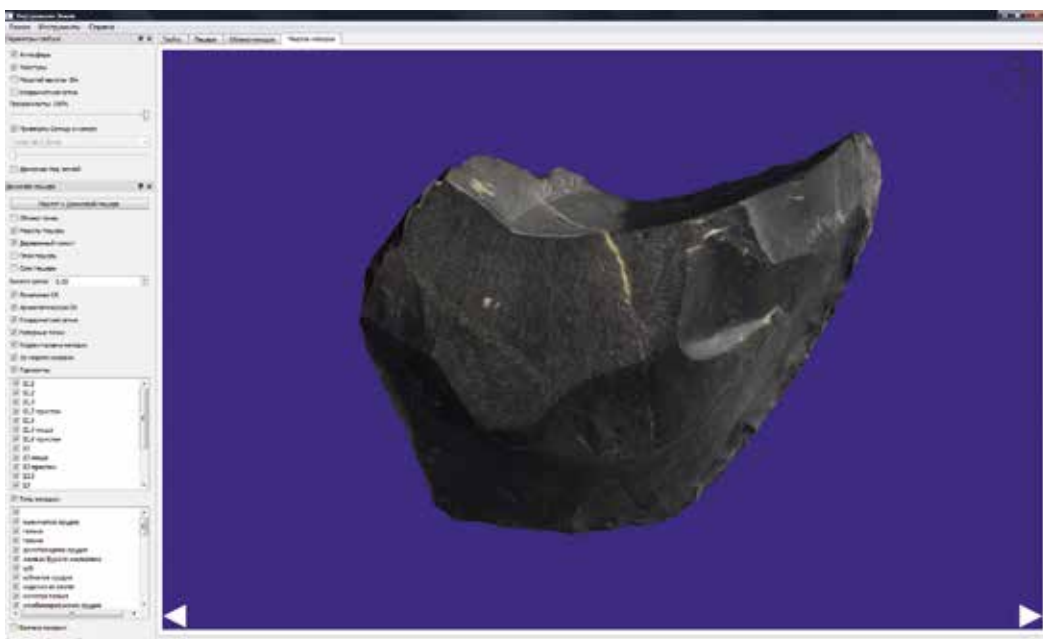
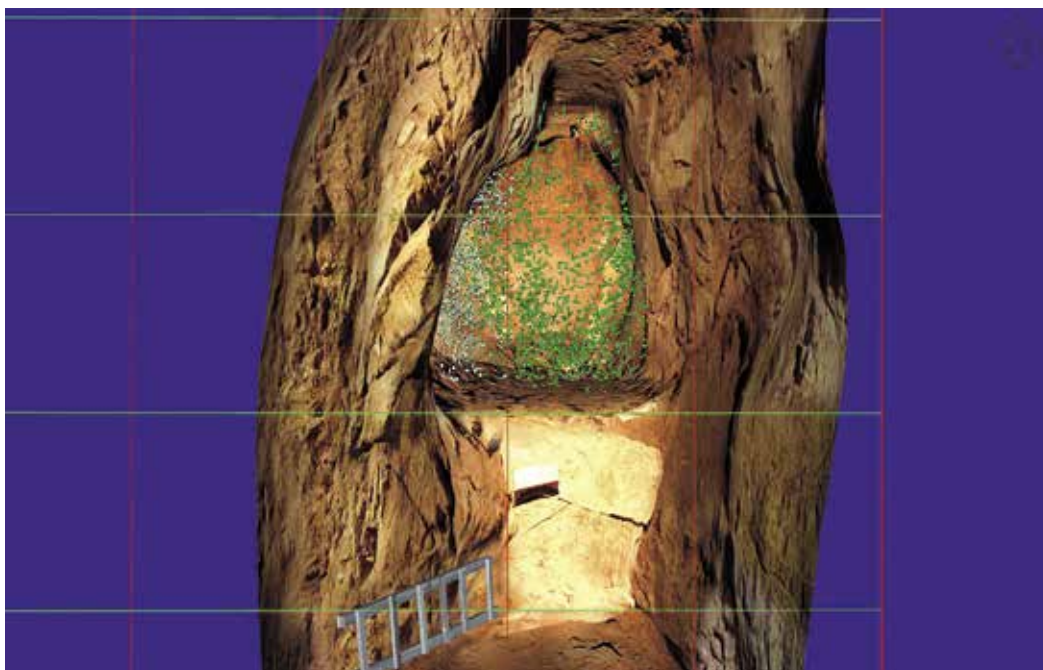


Рис. 7.
Визуализация расположения находок в восточной галерее. Показана координатная сетка с шагом 1 м

Рис. 8.
Текстурированная полигональная 3D-модель каменного артефакта

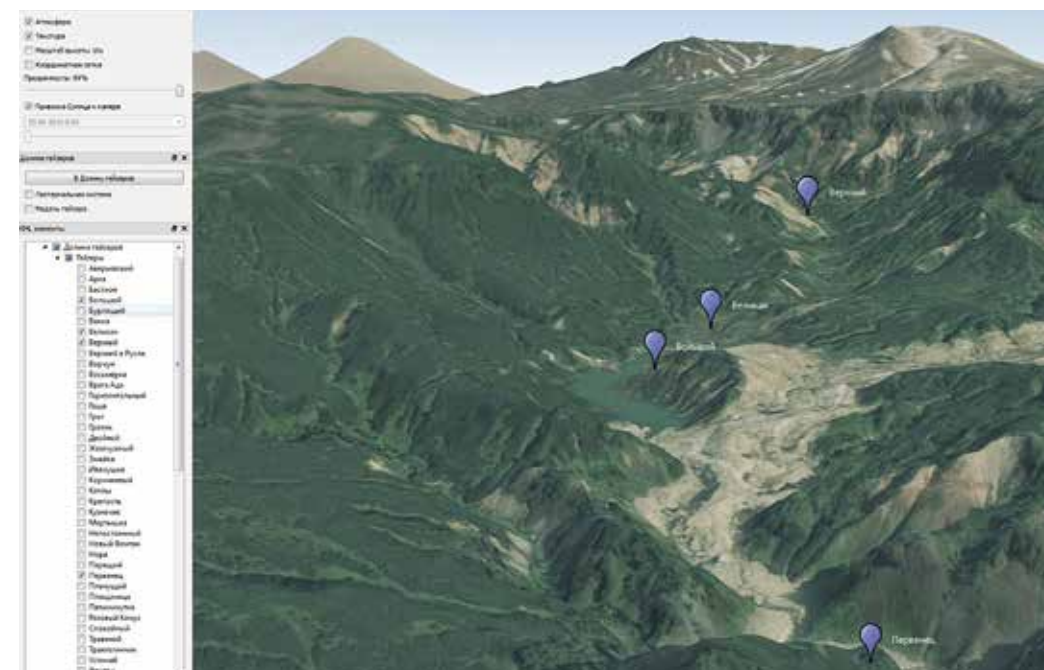


Рис. 9.
3D-модель территории в районе Долины гейзеров на Камчатке.
Общий вид

возможность горизонтального среза виртуальной модели на любом уровне для удобства визуального анализа геометрии пещеры и расположения находок (рис. 6–7).

В презентации предусмотрено четыре окна, между которыми пользователь может переключаться в произвольном порядке. В окне «Глобус» отображается виртуальный глобус с внедрённой в него трёхмерной моделью пещеры. Таким образом, можно изучить расположение пещеры на местности и окружающий рельеф (в низкой детализации, по общедоступным данным SRTM 90 м). В окне «Пещера» отображаются модели пещеры и других объектов (рис. 5). В окне «Облако находок» визуализируется только местоположение находок в археологических горизонтах. В окне «3D-модель находки» отображаются модели отдельных предметов с возможностью переключения между ними (рис. 8).

Созданный 3D-документ применяется как в демонстрационных, так и в исследовательских целях (например, для визуального анализа стратиграфии и осадконакопления). Также он может использоваться для организации виртуальной экскурсии как в составе музейной экспозиции, так и посредством общедоступного Интернет-ресурса. Это особенно актуально, так как Денисова пещера, расположенная на Алтае, является труднодоступным для посещения объектом.

Отметим, что при необходимости возможно создание 3D-модели территории большого размера с высокой детализацией, внедрённой в виртуальный глобус. Например, в проекте по моделированию Долины гейзеров на Камчатке (Алейников и др. 2011) нами была создана 3D-модель территории размером в сотни квадратных километров с разрешением текстуры 0,5 м/пиксель и разрешением цифровой модели рельефа 2,5 м/пиксель (рис. 9). Однако для этого требуются соответствующие (не бесплатные) спутниковые данные высокого разрешения.

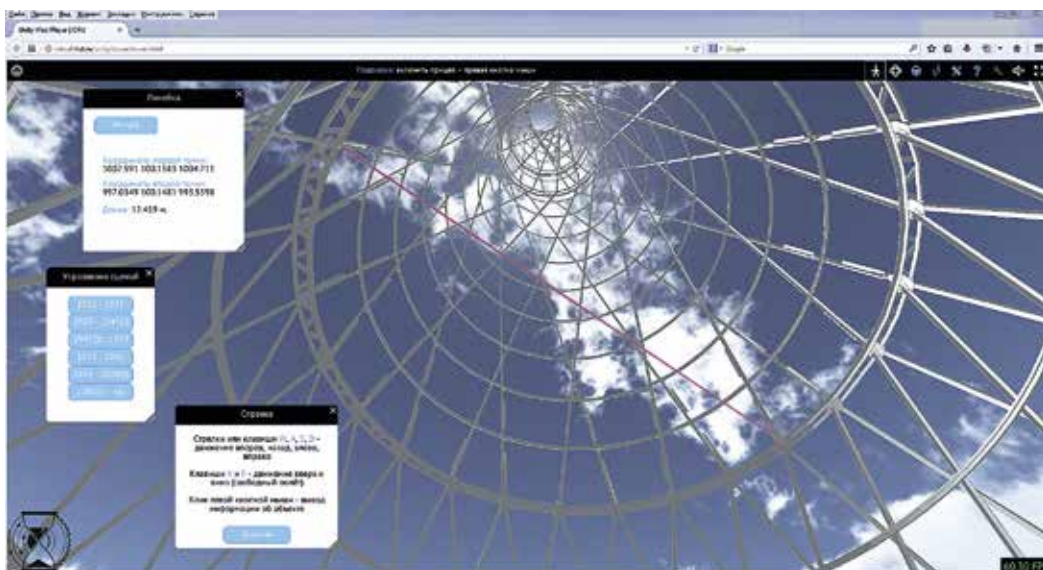


Рис. 10.
3D-модель Шуховской башни на Шаболовке. Веб-приложение на основе Unity3D

При организации веб-доступа к 3D-документам возникает ограничение на их объём: для слишком крупных виртуальных моделей время скачивания может оказаться слишком большим, что является некомфортным для интернет-пользователя. С другой стороны, веб-доступ позволяет обеспечить доступ к виртуальной модели более широкому кругу пользователей, чем автономное приложение. Это обуславливает большую привлекательность веб-приложений для задач виртуального музея и их несомненную перспективность (об этом свидетельствует и проект Smithsonian X 3D).

В рамках экспериментов с организацией веб-доступа к 3D-документам нами создано веб-приложение на основе Unity3D, которое позволяет рассматривать 3D-модель в режиме прогулки или свободного полёта, управлять отображением слоёв модели (например, отображать вид объекта в различные исторические периоды или показывать различную «наложенную» на 3D-модель информацию). Реализована также возможность измерения произвольных расстояний между элементами модели. При обновлении движка Unity3D планируется переход к бесплагинной технологии на основе WebGL. Разработанное веб-приложение может использоваться для демонстрации различных 3D-документов, в том числе в виртуальной среде (которая может имитировать реальность или быть полностью синтетической). Реализована также возможность связи элементов 3D-модели с базой данных, доступной через Интернет: например, вывод изображения или переход по гиперссылке при выделении элемента модели. Данное приложение (рис. 10) успешно используется для демонстрации виртуальной модели Шуховской башни на Шаболовке (<http://virtual.ihst.ru/unity/tower/tower.html>), разработка которой ведётся нами с 2011 года (Аникушкин, Леонов 2013).

Таким образом, с технической точки зрения 3D-модели практически любого масштаба и сложности сегодня успешно создаются и представляются пользователям

с применением различных технологий (от стереоскопических систем виртуальной реальности до веб-приложений). Несомненно, в ближайшее время мы будем наблюдать всё более широкое внедрение описанных технологий и подходов для развития виртуальных музеев.

Литература

Алейников и др. 2011

Алейников А. А., Бобков А. Е., Дроздин В. А., Ерёмченко Е. Н., Леонов А. В., Шпиленок Т. И. Интерактивное 3D-приложение «Виртуальная Долина гейзеров» // Компьютерные инструменты в образовании. 2011. № 4. С. 41–49.

Аникушкин, Леонов 2013

Аникушкин М. Н., Леонов А. В. 3D-моделирование Шуховской башни на Шаболовке на основе лазерного сканирования // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 4. С. 56–58.

Бородкин, Жеребятёв 2012

Бородкин Л. И., Жеребятёв Д. И. Технологии 3D-моделирования в исторических исследованиях: от визуализации к аналитике // Историческая информатика. 2012. № 2. С. 49–63.

Виртуальная археология 2013

Виртуальная археология: материалы Первой Международной конференции, состоявшейся в Государственном Эрмитаже 4–6 июня 2012 г. СПб. : Изд-во Государственного Эрмитажа, 2013.

Леонов и др. 2014

Леонов А. В., Аникушкин М. Н., Бобков А. Е., Рысь И. В., Козликин М. Б., Шуньков М. В., Деревянко А. П., Батулин Ю. М. Создание виртуальной 3D-модели Денисовой пещеры // Археология, этнография и антропология Евразии. 2014. № 3. С. 14–20.

Леонов, Батулин 2013

Леонов А. В., Батулин Ю. М. 3D-документ – новый тип научно-технической документации // Вестник архивиста. 2013. № 2. С. 192–205.

Технические рекомендации 2014

Технические рекомендации по созданию виртуальных музеев (актуальная версия 1.0) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://mkrf.ru/documents/recommendations/virtmuseums> (дата обращения: 05.02.2015).

Bawaya 2010

Bawaya M. Virtual Archaeologists Recreate Parts of Ancient Worlds // Science. 2010. Vol. 327, N 5962. Pp. 140–141.

Marczewski 2012

Marczewski A. Gamification: A Simple Introduction & a Bit More. USA : Amazon Digital Service, 2012.

Krause et al. 2010

Krause J., Fu Q., Good J. M., Viola B., Shunkov M. V., Derevianko A. P., Pääbo S. The complete mitochondrial DNA genome of an unknown hominin from southern Siberia // Nature. № 464 (8 April 2010). Pp. 894–897.

O. Hauck

Institute for Space Representation, Germany
Technical University of Darmstadt, Germany

P. Kuroczyński

Herder Institute for Historical Research on East Central Europe, Germany

CULTURAL HERITAGE MARKUP LANGUAGE –DESIGNING A DOMAIN ONTOLOGY FOR DIGITAL RECONSTRUCTIONS

1. Introduction

The rapid development of the Information Communication Technology (ICT) enforces the transformation of used analogue research methodologies into digital approaches in the humanities. As a result the emerging Digital Humanities are keen to set new research methods and standards. The revolutionary technology in the background of the current transformation process is the Semantic Web (Berners-Lee et al. 2001), introducing to us the idea of Linked Open Data. It is a concept based on a formal framework for representing knowledge, called ontology. This framework names and defines the types, properties and interrelationships of the entities in a domain of discourse. In the field of documentation of Cultural Heritage (CH), CIDOC-CRM is a long-term attempt at establishing semantic “glue” between different sources of information (<http://www.cidoc-crm.org>). ISO standard maybe?

As the increasing digitisation of CH leads to a rising amount of digital 3D data sets, several EU-projects are done in common human and machine readable description formats (e.g. 3D-COFORM, CARARE, 3D-ICONS). The research makes every effort to establish e-documentation and ensures the comprehensive, semantic enrichment of the 3D assets of Digital CH, currently expressed in the Metadata Schema CARARE 2.0 (D’Andrea, Fernie 2013). However this recent Metadata Schema reflects the necessity of data acquisition and semantic enrichment of 3D digitisation of still existing objects based on modern photogrammetry, structured light scanner, laser scanner or structure from motion technology. The CARARE 2.0 design of main themes, such as Heritage Asset, Activities, Digital Resources and Collection, does not respond to the different approach of a digital 3D reconstruction of not existing objects. This Metadata Schema is dedicated to the 3D documentation of digitised existing objects, not to 3D reconstruction based on hypothetical interpretation of remained primary and secondary sources. Cultural Heritage Markup Language (CHML) differs from existing CH related schemas because it describes CH objects from the 3D reconstruction point of view (<http://chml.foundation>).

2. Digital reconstruction towards Virtual Research Environments

The advancement of ICT resulted also in an increased application of computer-based visualisation of disappeared CH. However, in the field of digital reconstruction, these developments enhance cultural mediation in a popular way. It seems that the rapid development has overshadowed the scholarly aspects and content requirements of digital

reconstruction. Still, the lack of intelligibility and long-term availability of information, both being essential in academic research contexts, are not overcome in the 3D computer-based reconstruction and visualisation of CH. Beyond the overwhelming impression of pretty visualisation possibilities, a demand for “critical computer visualization” (Günther 2001) has been growing for a long time (Hauck et al. 2013; Stichel et al. 2011) [7] Cf. TU Darmstadt’s Hagia Sophia of Justinian light simulation model]. *For what? Alternative?* In 2006 it was finally recognised in the 4th Principle regarding documentation of process (“paradata”) in the London Charter (<http://www.londoncharter.org>): “Documentation of the evaluative, analytical, deductive, interpretative and creative decisions made in the course of computer-based visualisation should be disseminated in such a way that the relationship between research sources, implicit knowledge, explicit reasoning and visualisation-based outcomes can be understood” (Denard 2012).

But if the computer-based 3D reconstruction instead is seen as a holistic instrument of describing, recording and disseminating objects of CH (Kuroczyński 2012), it could be an alternative method to achieve new findings and to come to new conclusions: 3D reconstruction models could be used as a spatial information model (Cf. the architectural planning approach for prospective models:

- building information models (BIM): buildingSMART International Alliance for Interoperability) and

- “telling the story” by annotated context (<http://www.buildingsmart.com>).

Imagery then is only a by-product of such a semantically enriched 3D model that has to be published in a new way, preferably in a semantic Web environment.

An early approach has been the Akropolis 4D project (Berneburg et al. 2002) where 3D building parts of the Athenian Acropolis have been linked with the sources used for the 3D modelling. In effect, the idea of CHML, as an XML-based language for describing 3D reconstructions, has been introduced primarily at TU Darmstadt’s CeBIT booth in 2003 (Hauck, Noback 2003).

Recently first attempts arise to combine advantages of the 3D documentation and 3D reconstruction, and to deliver an adapted Virtual Research Environment (VRE) for surveying in archaeology, art history and architecture. The development and implementation of “WissKI” in a wider research field is promising for semantic enrichment of research data because of allowing reasoning and thus facilitating new findings (Scholz, Goerz 2012). A VRE for data acquisition, annotation and the digital reconstruction with a visual realtime 3D access is under constant development. The ongoing project “Digital Reconstructions in Virtual Research Environments. The Portal: Palaces and Parks in Former East Prussia” (<http://www.herder-institut.de/go/dp-962a8d>) affects the entire process of the digital reconstruction and focuses on further design of CHML. The subsequent implementation of CHML in a domain ontology – using “WissKI” – guarantees the data sets to be Linked Open Data, placing research results in a wider context and promising the possibility of “reasoning” out of linked Graph Database. Merging the humanities research and the digital 3D documentation and reconstruction with interactive visualisation methods, all based on a Graph Database expressed by the domain ontology, promises new, scholarly approved, methodology and findings (Stichel et al. 2011). Highest priority in establishing this kind of promising comprehensive VRE, e.g. for virtual archaeology, seems to lie in the development of a domain specific Metadata Schema, a groundwork for the implementation of a domain ontology, as well as in the determination of terms, identifying and classifying the items of interest. Thus semantic core of CHML is an attribute called TYPE that achieves exactly this recommendation. The TYPE attribute’s values are four-letter abbreviations which can

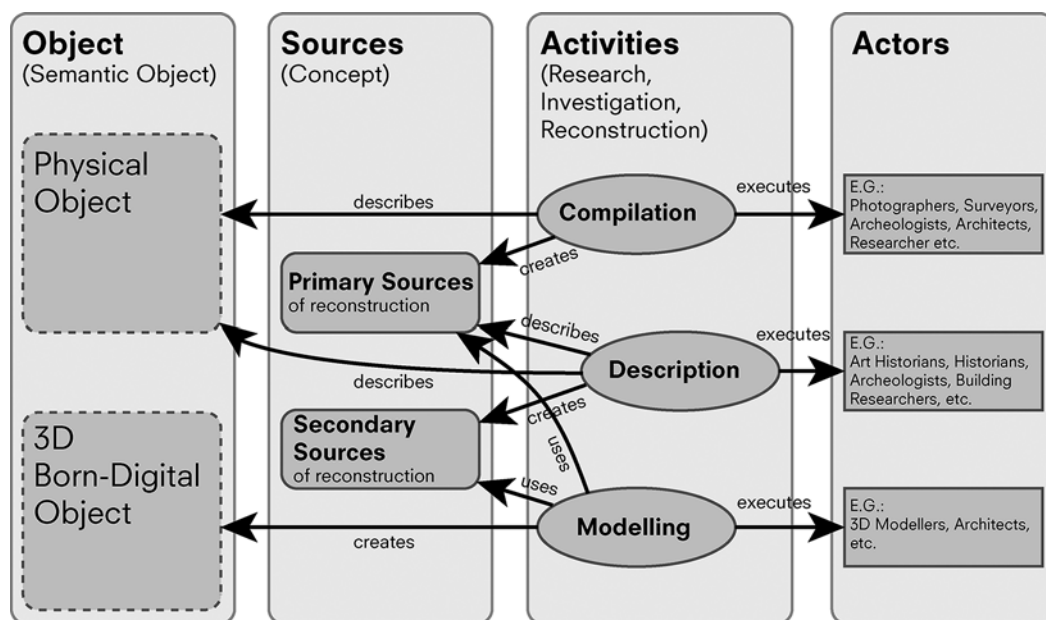


Fig. 1.
Digital 3D reconstruction workflow as described by CHML

be linked to multilingual definitions, thesauri, authority files, wikipedia articles, websites, e-publications, etc. It ensures a high flexibility for a variety of projects with different requirements and is the reliable basis for multilingual environments or changing terms due to linguistic development.

3. Digital 3D reconstruction process

The whole reconstruction process is based on sources: texts, and – most frequently – images and measurements. These sources are all created by activities. Even if the 3D modeller stands with his computer in front of a still existing object that he wants to model, he needs some kind of compilation activity like taking measurements manually or a 3D scan process to create the 3D model representing that object. Therefore the reconstruction process itself does not need the physical object that should be reconstructed as a source, because it only refers to sources representing it (fig. 1.)

The reconstruction process starts thus with the evaluation of sources having only an indirect relation to the physical object. In addition to that, there is no 3D model at the beginning, because the model is the final output of the reconstruction workflow. Hence there is nothing “real” to refer to at the beginning: neither the physical object that is lost in most of the cases, nor the 3D model as the final product – nothing to refer to but the object the modeller is thinking and talking about: the semantic object. This is the reason why CHML primarily describes semantic objects. Physical objects and 3D born-digital objects with their intrinsic properties are subcategories of the semantic object used as a rhetoric bracket. Beside the digital 3D reconstruction workflow, Figure 1 also shows that everything is bounded together by certain activities: investigation, research and reconstruction activities. From the reconstruction point of view, these activities are the relevant ones: any other kind of activity can be seen as a “historic event”. This is an important difference to

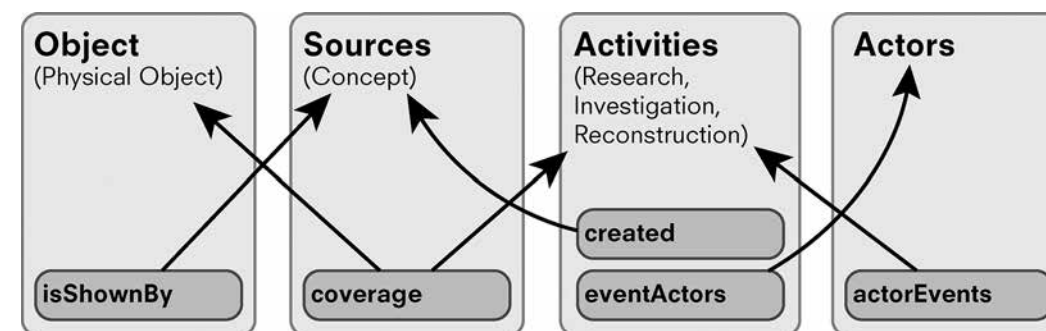


Fig. 2.
Some of the semantic relations between CHML's four main topics

other XML schemas in the field of CH, because they differentiate events and activities by defining activities as events with goals. An activity according to CHML is defined as an event with the goal of creating either sources or digital 3D reconstruction objects. The activities are described by so-called “protocols”. This workflow concept builds the framework for the four main topics of CHML: Objects, Sources, Activities and Actors. (In addition to that, there are some other auxiliary topics like locations, historic events, materials, light sources, camera settings, object's behaviour, scenes, etc.) Objects are seen as “semantic objects” with subcategories for physical objects and 3D born-digital reconstruction models (Kuroczyński et al. 2015).

Sources are seen separately from the information carrier object like bibliographic references commonly linked to the content of a book (ISBN) without taking into consideration the single book in the shelf of a library (signature). The information carrier object of a source can be part of the model. E.g. a painting hanging in a palace shows that same palace in the background. The scan or photography of that painting is described as a source, the painting itself is modelled as a part of the 3D reconstruction model and thus described as an object. In this special case, the relation of the source and object can be described by the “informationCarrier” element. The usual semantic link between sources and objects are the (Source) “coverage” and (Object) “isShownBy” elements (fig. 2).

4. Conclusion

CHML is a holistic approach describing digital 3D reconstructions. Combined with WissKI it provides not only a long-term storage format but also a powerful tool to compile all kinds of data about the 3D reconstruction process publishable in the semantic Web. The domain ontology is CIDOC-CRM compliant and the TYPE system allows to link project-intrinsic terms to broader thesauri etc. It is possible to embed 3D geometry in various data formats like OBJ, COLLADA DAE, etc. Further development is needed to define materials and light sources for render purposes on the basis of scientific definitions using CHML.

References

Berneburg et al. 2002

Berneburg A., Hauck O., Noback A. Akropolis 4D. Available: <http://www3.architektur.tu-darmstadt.de/akropolis4d.com/catalog/site/propyl/middle/west/gebaelk/geison/index.php>. Accessed 28 October 2014.

Berners-Lee et al. 2001

Berners-Lee T., Hendler J., Lassila O. The semantic Web. A new form of Web content that is meaningful to computers will unleash a revolution of new possibilities // Scientific American Magazine May. 2001. Pp. 34–43.

D'Andrea, Fernie 2013

D'Andrea A., Fernie K. CARARE 2.0 – a metadata schema for 3D cultural objects. Proceedings of the 2013 Digital Heritage International Congress. 2013. Pp. 137–143.

Denard 2012

Denard H. A new introduction to the London Charter // Paradata and Transparency in Virtual Heritage / A. Bentkowska-Kafel, D. Baker, H. Denard (eds.). London : Ashgate, 2012. Pp. 57–71.

Günther 2001

Günther H. Kritische Computer-Visualisierung in der kunsthistorischen Lehre. In M. Frings. Der Modelle Tugend. CAD und die neuen Räume der Kunstgeschichte. Weimar, 2001. P. 111.

Hauck et al. 2013

Hauck O., Noback A., Grobe L. Computing the “Holy Wisdom”. Contributions in Mathematical and Computational Sciences 3. // Scientific Computing and Cultural Heritage. Contributions in Computational Humanities. G. Bock, W. Jäger, W., M. Winckler, (eds.). ; Berlin; Heidelberg, 2013, Chapter 22. Pp.

Hauck, Noback 2003

Hauck O., Noback A. CHML – Cultural Heritage Markup Language. Eine Auszeichnungssprache für das gebaute Weltkulturerbe, Presentation at CeBit 2003. Available: <http://archipelagus.de/lenya/archipelagus.de/live/chml-index/CeBit03.html>. Accessed

ISO 21127: 2014

ISO 21127: 2014 Information and Documentation – A Reference Ontology for the Interchange of Cultural Heritage Information. Available: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=57832. Accessed 4 February 2015.

Kuroczyński 2012

Kuroczyński P. 3D-Computer-Rekonstruktion der Baugeschichte Breslaus. Ein Erfahrungsbericht. Jahrbuch des Wissenschaftlichen Zentrums der Polnischen Akademie der Wissenschaften in Wien. Wien, 2012. Pp. 201–213.

Kuroczyński et al. 2014

Kuroczyński P., Hauck O., Dworak D. Digital reconstruction of cultural heritage – questions of documentation and visualisation standards for 3D content. Proceedings of the 5th International EuroMed 2014. Limassol/Cyprus, 2015 (in press).

Kuroczyński et al. 2015

Kuroczyński P., Hauck O., Dworak D., Lutteroth J. Virtual museum of destroyed cultural heritage – 3D documentation, reconstruction and visualisation in the semantic Web. Virtual Archaeology (Methods and Benefits). Proceedings of the Second International Conference at the State Hermitage. Saint Petersburg : The State Hermitage Publishers, 2015. Pp. 54–61

Scholz, Goerz 2012

Scholz M., Goerz G. WissKI: a virtual research environment for cultural heritage. ECAI 2012: Proceedings of the 20th European Conference on Artificial Intelligence. Amsterdam, 2012. Pp.

Stichel et al. 2011

Stichel R. H. W., Hauck O., Noback A. Licht in der Hagia Sophia Justinians – eine computergestützte Simulation. Licht-Konzepte in der vormodernen Architektur, Diskussionen zur Archäologischen Bauforschung / in P. I. Schneider, U. Wulf-Rheidt (eds.). Regensburg, 2011. Bd.10. Pp. 271–279.



SUMMARIES

D. Hookk

VIRTUAL ARCHAEOLOGY: MODERN CHALLENGES

Since 1990, the time when Paul Reilly proposed a term *virtual archaeology*, methods of archaeological prospection and computer methods themselves have changed. The original meaning supposed excavation recording with possibility of re-excavation and three-dimensional modeling. Later it was transformed into dissemination of archaeological results, visualization with the help of 3D programming and game engines. Thus the accent shifted from the validation of scientific hypotheses to distribution of scientific knowledge. Further studies have demonstrated that scientists concentrated more on augmented reality and interactive virtual environment. That was instigated by the intensive development of hard- and software for the computer technologies. However, there has been a recent tendency to return to the original idea of scientific discussion and to prove scientific hypotheses by means of virtual reality; the so-called *spirit of virtual archaeology* has become a trend.

Key words: spirit of virtual archaeology, virtual reality, virtual museum, validation of the scientific hypothesis, dissemination of knowledge

Ключевые слова: дух виртуальной археологии, виртуальная реальность, виртуальный музей, проверка научной гипотезы, распространение знаний

П. Рейли

ВОЗВРАЩЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ВИРТУАЛЬНУЮ АРХЕОЛОГИЮ

По своей сути, наука археология – это изучение материальной культуры прошлого, или так называемого археологического материала. Однако термин «археологический материал» неоднозначен и подразумевает не только физически существующие данные, но и данные, созданные самими археологами. Поскольку такие данные все больше и больше подвергаются оцифровке, наше взаимодействие с ними, в большей степени через экраны или кажущиеся нематериальными программные среды, становится скопическим (визуальным). Я считаю, что развитие аддитивных производственных технологий позволит внести кинестетическую составляющую или контекст взаимодействия с объектом познания, который вдохновляет археологов в поле, и таким образом сблизить реальную и виртуальную археологию.

В данной работе показано, в чем и как аддитивные производственные технологии (например, печать в 3D) и виртуальная археология могут сыграть жизненно важную роль в развитии археологической теории и практики.

Ключевые слова: 3D-printing, аддитивные технологии, археологический материал, архив, мультисенсорный, визуальность, сенсорность, виртуальная археология

Key words: 3D-printing, additive manufacturing, archaeological record, archive, multi-sensory, scopic, screenic, virtual archaeology

С. Хермон, Ф. Николучи

ТРЁХМЕРНАЯ АРХЕОЛОГИЯ: МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ – ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СООБРАЖЕНИЯ

Виртуальная археология и её трёхмерная составляющая демонстрируют постоянно растущий интерес к ним, если судить по научной археологической литературе, начиная с введения термина в научный оборот более двух десятилетий назад. Основная тема, на которую обращают внимание, – это вклад виртуальных реконструкций в популяризацию археологии и, в более широком смысле, культурного наследия, представления археологических открытий широкой публике в образовательных целях или, в некотором смысле, выяснения археологических вопросов и создания киберпространства, в котором взаимодействие с данными происходит инновационным способом. Значительная часть интеллектуальных усилий затрачивается на развитие технологий, обеспечивающих высокую степень реалистичности, интерактивности с цифровыми данными и адаптацию к различным каналам доступа (например, онлайн, мобильные гаджеты и т.д.). Последние несколько лет наблюдаются многочисленные публикации, посвящённые инновационным подходам к записи трёхмерных данных полевых исследований и алгоритмам их оптимизации, устройствам записи или сопутствующему программному обеспечению. Другое направление современных разработок ориентировано на создание хранилищ трёхмерных данных и семантического описания этих 3D-моделей. В докладе предлагается заполнить существующий разрыв в этой области путём осуществления конкретных мер, необходимых для адаптации 3D как методологии исследований в археологии, имеющей целью формальное представление 3D-аргументов и прозрачность данных.

Ключевые слова: виртуальная археология, обоснование трёхмерности, представление формализованных документов

Key words: virtual archaeology, 3D reasoning, formal knowledge representation

И. Лирицис, П. Волонakis

КИБЕРАРХЕОМЕТРИЯ В КОНТЕКСТЕ КИБЕРАРХЕОЛОГИИ: СОВРЕМЕННЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ТЕНДЕНЦИИ В ОБУЧЕНИИ АРХЕОМЕТРИИ И ИССЛЕДОВАНИЯХ

Современные подходы к образованию в сфере культуры и археологии представлены с помощью новых технологий – киберархеологии и киберархеометрии в рамках виртуальной археологии. Прошлое не может быть переделано, но может быть воспроизведено. Трёхмерное моделирование является мощным инструментом для идентификации, мониторинга, сохранения, реставрации и укрепления археологических объектов. В этом контексте компьютерная графика может содействовать археологии и культурной политике, предоставляя учащимся «шестое чувство» для понимания прошлого, как если бы они могли в нём жить. Воспроизведение развивает виртуальные возможности и, как следствие, возможности интерпретации. Мы рассказываем от лица аватара о первых контактах с киберархеометрией посредством киберпредставления процессов в петрографическом (оптическом) микроскопе в пространственно-временной экосистеме археометрической лаборатории. Программная

разработка выполнена при помощи средств трёхмерного моделирования и игрового движка Unity 3D.

Ключевые слова: виртуальное окружение, виртуальная реальность, геймификация, серьёзные игры, анимация, 3D-моделирование, фонды культуры, киберархеология, киберархеометрия, виртуальная лаборатория, микроскоп, диффузия, обсидиан, практикум

Key words: virtual environment, virtual reality, gamification, serious games, animation, 3D modeling, cultural assets, cyber-archaeology, cyber-archaeometry, virtual lab, microscope, diffusion, obsidian, training

V. Ivanov, S. Strelkov, A. Kholina, A. Avtyushenko

VIRTUAL RECONSTRUCTIONS FOR MULTIMEDIA EXHIBITIONS OF CULTURAL HERITAGE OBJECTS

The paper covers a number of cultural heritage preservation projects carried out by the Department of Engineering Graphics and Design of Saint Petersburg Polytechnic University.

Method of creating highly precise 3D models of historical objects from photographs. With minimal costs this method makes it possible to produce a 3D model of any object (not larger than 3 m × 3 m) with the use of a camera and additional light source. The general model is based on photographs made from a variety of points while the relief map applied to it is formed by the light coming from different directions. This method conveys every minor unevenness and detail of the object sparing the use of expensive 3D scanning equipment.

Multimedia project for the “Revitalized Archaeology” exhibition. The project was done for the Grand Menshikov Palace in Oranienbaum (Leningrad Region). Ten archaeological objects were modeled with the help of 3D graphics and animation, based on their surviving fragments and available historical data. The 3D models show how the objects used to look, what their environment was like, how their fragments were connected and where they were placed in the historical interiors. To make the objects look even more real their virtual cards were created. They make it possible to observe the objects with the help of the augmented reality technology. The highly realistic visualization of the objects and fast feedback provide for the realistic interaction with them.

The Summer Gardens. When the Summer Gardens (Saint Petersburg) were reopened after their renovation, a multimedia video was made for demonstration in its Dovecote Pavilion. Featuring archaeological excavations on the site and further reconstruction of various structures and objects, it traces major stages of the reconstruction of the Gardens’ original layout.

Reconstruction of the historical town of Kratovo (Macedonia). The Department has launched a project of historical reconstruction of the town of Kratovo, within the international Horizon 2020 program, together with the ENEA Centre of the University of Bologna (Italy). A 3D model of the town and its underground caves is to be produced with the help of drones (unmanned aircrafts). The model, along with historical data research, is to serve as foundation for the virtual reconstruction of the town’s original appearance and layout and creation of its large-scale model.

Key words: virtual reconstructions, multimedia technologies, augmented reality

Ключевые слова: виртуальные реконструкции, мультимедийные технологии, дополненная реальность

Р. Леви, П. Доусон

ФОРТ КОНГЕР. ИНТЕРАКТИВНЫЙ ВИРТУАЛЬНЫЙ МИР ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НАУКИ В XIX ВЕКЕ

Форт Конгер являлся одной из самых удаленных научных баз Канадской Арктики XIX века. Построенные в 1881 году на острове Эллесмер разнообразные деревянные сооружения служили постоянной базой для ученых и военных, где проводились научные исследования. Под руководством лейтенанта Адольфа Грили, Форт Конгер стал одной из 14 экспедиций, работавшей в Первый Международный Полярный год. На грант, выделенный Виртуальным музеем Канады, разработан сайт со встроенными виртуальными пространствами, которые позволяют посетителям узнать о важности этой научной экспедиции для североамериканской истории. Точный трёхмерный макет Форты Конгер создан на основе лазерного сканирования данных, реальных артефактов и исторических документов. В этом виртуальном пространстве посетители узнают, какую роль играла эта база в получении метеорологических, геофизических и биологических данных во время Первого Международного Полярного года. Они виртуально перенесутся в осень 1883 года, когда Форт Конгер был экстренно эвакуирован. Путешествуя во времени, посетитель сайта должен будет решить ряд задач и таким образом раскрыть загадки этого исторического места.

Ключевые слова: информатика, трёхмерные изображения, виртуальная реальность, Арктика

Key words: computing, 3D-imaging, virtual reality, Arctic

П. Курочинский

О. Хаук

Я. Луттерот

Даниэль Дворак

ВИРТУАЛЬНЫЙ МУЗЕЙ УТРАЧЕННОГО КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ – 3D-ДОКУМЕНТИРОВАНИЕ, РЕКОНСТРУКЦИИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ В СЕМАНТИЧЕСКОЙ ПАУТИНЕ

В работе рассказывается о сложностях, возникающих в ходе создания компьютерными методами трёхмерных реконструкций утраченных и/или нереализованных объектов искусства и архитектуры. Растущий объем трёхмерных документов и проектов трёхмерных реконструкций (трёхмерных данных), с одной стороны, и ряд нерешенных проблем электронной документации и длительного хранения полученных знаний «внутри и вокруг» трёхмерных моделей, с другой, требуют приложения дополнительных усилий на стыке междисциплинарных исследований и виртуальной археологии.

Автор вводит в курс сложной дисциплины и предлагает новые подходы к получению данных, моделированию геометрических параметров, семантическому моделированию данных (онтологии предметной области), их сохранению в базах знаний (RDF-хранилища) и визуализации моделей знаний (в технологии WebGL).

Ключевые слова: виртуальный музей, виртуальная научная окружающая среда, цифровая реконструкция, трёхмерная визуализация

Key words: virtual museum, virtual research environments, digital reconstruction, 3D visualization

V. Mokrushin, M. Kozlov

3D CADs APPLIED IN ARCHAEOLOGICAL STUDIES

The intent to reasonably synchronize the process of field works with the creation of an album of graphic documentation for the report draws the attention of the specialists who study ancient monuments to the opportunities of CAD software. AutoCAD is mostly used for this. The best way is to form a chain of interconnected files which store the outlined drawings made on graph paper. These illustrations will be automatically reproduced in the synoptic document. They are easily combined and entirely transferred, with all the required settings altered. Upon acquiring necessary skills one can create an elementary 3D model of the excavation, which helps both successfully monitor the wall junctions and simultaneously introduce all the necessary corrections and alterations. It's high time to start using one of the free powerful CAD systems like BRL-CAD, FreeCAD, Open CASCADE Technology, AR-CAD etc. Among Russian products of this type nanoCAD Free can be recommended.

Key words: CAD tools, archaeological prospections, AutoCAD, FreeCAD

Ключевые слова: системы автоматического проектирования, археологические исследования, AutoCAD, FreeCAD

M. Zhukovsky

USE OF MULTI-ROTOR DRONES AND PHOTOGRAMMETRY TECHNOLOGIES OF IMAGE PROCESSING FOR ARCHAEOLOGICAL PROSPECTIONS

The use of drones has recently become an established tool of modern archaeological research. As a rule drones provide highly-detailed large-scale images of separate archaeological objects, archaeological complexes and even entire micro regions. A stand-alone type of unmanned aircrafts widely involved in archaeological prospections are multi-rotor drones. Their popularity is primarily explained by the fact that their technical specifications and characteristics are in keeping with the scale and requirements of archaeological tasks carried out by means of remote sensing.

The paper overviews the practical use of multi-rotor drones in modern archaeological prospections aimed at tackling a wide range of objectives, i.e. making orthophotoimages/ mosaics of archaeological objects in various projections, digital elevation (microrelief) and surface models, high-precision plans as well as monitoring the state of archaeological monuments and sites and designing their preservation zones.

Key words: multi-rotor drones, aerial photography, photogrammetry, orthophotoimages/ mosaics, digital elevation model

Ключевые слова: 3D-моделирование, Литориновая трансгрессия, памятники неолита – раннего металла на территории Санкт-Петербурга, побережье восточной Балтики в голоцене, палеорельеф восточной части Финского залива, палеогеографические реконструкции в голоцене

Й. В. Фассбиндер, А. Гасс, И. Хофманн, А. Б. Белинский, Г. Парцингер

КУРГАНЫ РАННЕГО ЖЕЛЕЗНОГО ВЕКА И ИХ ПЕРИФЕРИЯ: НОВЕЙШИЕ НАХОДКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ НА СЕВЕРНОМ КАВКАЗЕ

Последние археологические исследования и магнитная разведка больших курганов раннего железного века не только проливают свет на эти монументальные сооружения, но и дают возможность по-новому воспринимать погребальные церемонии. Согласно новому определению больших курганов, они состоят не только из гробницы, но и из всего, что найдено на периферии.

В изучении окружения курганов весьма полезным может оказаться геофизическая разведка большой области. Особенно магнитометрическая разведка позволяет проводить крупномасштабную и одновременно высокочувствительную разведку объектов с высоким пространственным разрешением. Хотя невозможно рассмотреть детали погребения на глубине нескольких метров, вполне возможно, по крайней мере, определить детали архитектурной конструкции. На периферии курганов мы обнаружили множество других объектов, таких как сопутствующие погребения, отдельные погребальные вещи, вторичные захоронения, дополнительные отсеки, жертвенные ямы, остатки кремации и другие, связанные с погребением находки. Здесь мы предлагаем примеры последних находок из раскопанных курганов, которые не только дополняют наши знания, но и в сочетании с геофизическими методами открывают много нового и указывают на большой потенциал такого междисциплинарного подхода к исследованию.

Ключевые слова: ранний железный век, Северный Кавказ, курган, периферия, геофизика, цезиевый магнитометр

Key words: Early Iron Age, Northern Caucasus, kurgan, periphery, geophysics, caesium magnetometer

А. Асэндудезей, Н. И. Христи, М. Асэндудезей

АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗВЕДКИ И ОЦЕНКА ПРИРОДНЫМИ РИСКАМИ НА ДОИСТОРИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКАХ В ВОСТОЧНОЙ РУМЫНИИ НА ПРИМЕРЕ ПОСЕЛЕНИЯ В КОСТЕШТИ (ЯССЫ, РУМЫНИЯ)

Сегодня в области археологии повсеместно признано, что археологические объекты, более, чем когда-либо, находятся под угрозой природных и человеческих факторов. Современные археологи понимают актуальность этой проблемы и признают необходимость использования новых исследовательских методов, заимствованных из археометрии. Забота о национальном культурном наследии в соединении с концепцией управления культурными ресурсами ставит перед научным сообществом задачу применения современных методов анализа археологических объектов, которые обеспечат их бережное изучение, применимое ко всем историческим циклам. Данная работа рассказывает об исследованиях, проводимых на основе совокупного применения и улучшения качества неразрушающих методов (аэрофотосъемки, магнитометрии, GPR, электрического сопротивления, наземного 3D лазерного сканирования), при том, что мы признаем всю сложность и ценность доисторических археологических объектов. В прямой связи с этим мы рассматриваем выявление, оценку и наблю-

дение за объектами, находящимися под неблагоприятным воздействием природных или человеческих факторов, на основе создания единой исследовательской модели, соединяющей все перечисленные выше методы и принципы. Внимательное изучение геоморфологических и морфометрических характеристик и особенно динамики эрозивных процессов позволяет составить полную информационную картину.

Ключевые слова: геофизика, аэрофотосъемка, 3D лазерное сканирование, доисторическая археология, Восточная Румыния

Key words: geophysics, aerial photos, 3D laser scanning, prehistoric archaeology, Eastern Romania

D. Bugrov, I. Gaynullin, A. Kasimov, A. Sitdikov
A. Starovoitov, B. Usmanov, I. Chernova

COMPLEX APPROACH TO DATA COLLECTING FOR THE VISUALIZATION OF THE CULTURAL HERITAGE OF THE SVIYAZHISK ISLAND CASTLE

One of the objectives of the Tartar Republic program for restoration of its cultural and historical sites, adopted in 2011, was creation of a virtual model of the town of Sviyazhsk which would show all its historical monuments and archaeological sites. A combination of technologies was employed for the presentation of its historical and cultural heritage.

1. Creation of GIS which consists of several layers, i.e. historical maps and plans of Sviyazhsk and the area around it, aerial and space photos, and archaeological evidence of the past.

2. Use of photogrammetry for the construction of 3D models of such archaeological sites as architectural ruins and surviving parts of medieval wooden structures; use of these data in GIS.

3. Laser scanning of historical buildings done in the local coordinate system for linking it to other GIS data of Sviyazhsk. The main aim of laser scanning is creation of drawings with measurements and 3D models.

The final result of the project is construction of a virtual model of the historical development of Sviyazhsk, available on the Web.

Key words: laser scanning, photogrammetry, GIS, Sviyazhsk, Web, virtual model

Ключевые слова: лазерное сканирование, фотограмметрия, ГИС, Свияжск, web-ресурс, виртуальная модель

P. Sorokin, A. Sergeev, T. Gusentsova, D. Ryabchuk, M. Kulkova

PALEOLANDSCAPE OF THE COASTAL ZONE OF THE LITTORINA SEA NEAR THE ARCHAEOLOGICAL SITE OKHTA 1

The archaeological site in the Okhta Cape offers new evidence for the reconstruction of paleogeographic conditions in the Saint Petersburg region in the Neolithic – Early Iron Age period (late 6th – 1st centuries BC). The analysis of literary sources and archaeological data reveals that in the Littorina regression period (6500–5500 VR) the discussed area was a coastal zone of a lagoon separated from the open Littorina Sea by a foreland and joined

to it somewhere near the modern Neva River bed. Reconstruction of the Neolithic surface relief, i.e. coastal zone of the shallow lagoon, was done with the 3D modelling program (3ds max 9.0) using lithological sections and absolute level marks. The paleographic level rose to 2.50 (Baltic System) in the central and south parts which were a "living zone" and dropped to 0.50–1.0 (BS) in the east and west where there was a "fishing and hunting zone". In the following regression phase (5200–4500 VR) a narrow gulf was formed along the Neva's paleovalley, which provided good conditions for the development of fishing.

The elevation paleoreconstruction for different phases of the Littorina Sea's development in the Saint Petersburg region was done with the Surfer program using the data on the modern terrestrial relief, a map of ground overlays and bathymetric map of the east part of the Finland Gulf. The paleolandscape reconstruction presents ancient habitats of the Littorina Sea coast and makes it possible to understand the nature of the local population's fishing and hunting activities.

Key words: 3D modeling, Littorina transgression, памятники neolithics – Early Iron Age monuments in Saint-Petersburg environment, east Baltic shore in Holocene, paleolandscape east part of the Finland Gulf, paleogeographic reconstructions in Holocene

Ключевые слова: 3D-моделирование, Литориновая трансгрессия, памятники неолита – раннего металла на территории Санкт-Петербурга, побережье восточной Балтики в голоцене, палеорельеф восточной части Финского залива, палеогеографические реконструкции в голоцене

M. Daragan

3D MODELING OF KURGAN CONSTRUCTIONS IN THE ENEOLITHIC TIME – EARLY BRONZE AGE

Most ancient kurgans in the steppes of the Northern Black Sea coast date to the eneolithic time, 4th millennium BC, thus preceding the mass construction of kurgans in the same area in the pit grave (Yamna) culture. The mounds over the eneolithic burials in the Northern Black Sea coast steppes used to be rather sophisticated. There are plain kurgans built in one go but there are also stratigraphically sophisticated kurgans erected in several phases. The latter are more informative and allow to trace the development of kurgans' construction throughout time.

Based on the materials of Kurgan 29 near the settlement of Shevchenko (close to the town of Ordzhonikidze, Ukraine) explored in 2003, a reconstruction was made of the outward appearance of ancient kurgans and post hole sanctuaries built by the representatives of eneolithic and early pit grave cultures in the steppes of the Northern Black Sea coast. It digitally shows four stages of the kurgan's construction. The first three stages are represented by the construction of mounds over three middle eneolithic burials and one or two first mounds of a post hole sanctuary, while the fourth phase is represented by the construction of a mound over a burial of the grave pit (Yamna) culture. The virtual reconstruction makes use of the well-preserved archaeological evidence which permits to see the object's changes throughout time.

Key words: kurgan, eneolithic, grave pit (Yamna) culture, sanctuary, reconstruction

Ключевые слова: курган, энеолит, ямная культура, святилище, реконструкция

М. Райковска, Г. А. Биван, И. Васильев

ИНТЕГРАЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДАЛЬНОСТЕЙ В ВЫСОКОТОЧНЫЕ ТРЁХМЕРНЫЕ МОДЕЛИ ЗДАНИЙ: НА ПРИМЕРЕ ЦЕРКВИ СВЕТА ПЕТКА

Сочетая в себе высокую точность, низкую себестоимость и относительную простоту использования, цифровая фотограмметрия, в отличие от других 3D-технологий, соединяет в себе фотореалистичную текстуру и 3D-геометрию. Этот основанный на 3D-изображениях метод легко сочетается с другими вычислительными фотографическими техниками. Данная работа рассказывает о цифровой документации церкви Света Петка (XVI – начало XVII века), расположенной в селе Балши под Софией (Болгария) и частично разрушенной. Помимо создания законченной фотограмметрической модели всей церкви, в 2014 году в ходе работ на раскопках (в седьмой раз в рамках фотоэкспедиции по средневековым Балканским церквям от Фонда наследия Балкан) были записаны и сохранены, с помощью RTI метода, плохо читаемые граффити на поверхности внутренних фресок и улучшена контрастность старейших фресок с помощью цветовой декорреляции. Авторы показывают, как эти три технологии сочетаются в программах 3D-моделирования, соответствующих производственным стандартам.

Ключевые слова: фотограмметрия, RTI, DStretch, пост-византийская, церковь, архитектура, фреска, реконструкция

Key words: photogrammetry, RTI, DStretch, post-Byzantine, church, architecture, fresco, reconstruction

Л. Кюне, Й. В. Фассбиндер, Р. Линк, Ф. Бекер

РИМСКИЕ ПРЕДМЕСТЬЯ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ НОРИКУМА И ОТКРЫТИЕ НОВОЙ РИМСКОЙ ДЕРЕВНИ

Представляется, что процесс романизации сельской части римской провинции Норикум начался гораздо раньше и шел медленнее, чем в других северо-западных провинциях. Недавние исследования, основанные на геофизических изысканиях, дают гораздо более полное представление о плотности и непрерывности заселения римских сельских районов. Более ранние раскопки, подъемные материалы и аэрофото-съёмка позволяли получить лишь поверхностное представление о рассматриваемой теме. Геофизические измерения, проведенные в рамках проекта «Римские сельские виллы баварской части древнего Норикума», позволили представить, как выглядела сельская часть этой провинции в римские времена. Результаты новейших геофизических исследований (2013/14 гг.) показали, что мы стали глубже понимать ландшафт в археологическом контексте. Совместное использование геофизических методов исследования, аэрофотографии и данных дистанционного зондирования позволяют сделать предварительную виртуальную реконструкцию римской сельской виллы.

Ключевые слова: интегрированные методы исследований, археологическая геофизика, интерпретация, римская сельская вилла, Норикум, Южная Бавария

Key words: integrated prospecting methods, archaeological geophysics, interpretation, Roman villae rusticae, Noricum, Southern Bavaria

С. К. Т. С. Вэрмлэндер, С. Шольц, Ш. Шлагер

УСЛОВНЫЕ И ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ КАК МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

Поскольку коэффициенты Фурье передают разную и часто более детальную информацию о форме, в отличие от измерения на основе традиционной евклидовой геометрии, они чаще используются для морфометрического анализа в таких областях, как археология и физическая антропология. Двухмерный эллиптический анализ Фурье стал очень популярен для замкнутых контуров, с момента его появления в 1980-х годах, потому что это преобразование работает со сложными очертаниями и, более того, не зависит от положения контура. Таким образом, оно хорошо подходит для количественных сравнений форм.

Для менее сложных очертаний условное преобразование Фурье остается действенным способом, производящим меньшее количество коэффициентов, дополнительное преимущество которых в том, что они напрямую передают информацию о симметричности форм. Поэтому важно знать, в каких ситуациях предпочтительнее традиционный анализ Фурье, а в каких – эллиптический.

В данном исследовании мы использовали как традиционное преобразование Фурье, так и эллиптический Фурье-анализ для изучения среднелицевых контуров человеческого черепа у разных географических популяций. Численные данные контуров были получены с помощью 3D-моделей поверхности, построенных с применением переносного лазерного сканера. Полученные коэффициенты Фурье применялись для количественного анализа симметрии лица и выработки дискриминантных функций, определяющих особенности черепного строения в зависимости от географической принадлежности. Отталкиваясь от результатов, мы обсуждаем «за» и «против» обоих подходов, примененных для анализа формы в археологии и физической антропологии.

Ключевые слова: судебно-медицинская антропология, трёхмерное лазерное сканирование, цифровая морфометрия, черепная морфология

Key words: forensic anthropology, three-dimensional laser scanning, digital morphometrics, cranial morphology

A. Pakhunov

RECORDING OF THE CURRENT STATE OF PRESERVATION AND TRACKING PREVIOUS CONSERVATION WORKS ON PALAEOLITHIC PAINTINGS USING REFLECTANCE TRANSFORMATION IMAGING: THE KAPOVA CAVE CASE

Reflectance Transformation Imaging (RTI) is a photography-based documentation technique primarily used for surface visualisation. It has been successfully applied to studying high-reflectivity objects like coins and enamels. It also helps recognise traces of altered paint or microrelief structures on surfaces with uneven textures. So far, at least 50 paintings from Kapova Cave (Southern Ural, Russia) with a considerable variation in their current conditions have been described. This allowed us to use RTI not only for the exploration of the current state of the paintings on various substrates, but it was also

invaluable for monitoring the dynamic changes of the corresponding surfaces caused by mineral formation. This technique (combining with UV-photography) proved useful for the evaluation and comparison of the extent and type of conservation works on several paintings produced in the 1960s and 2008.

Ключевые слова: Капова пещера, палеолитическая живопись, реставрация, кальцит, многоугольная теневая фотосъёмка

Key words: Kapova Cave, Paleolithic painting, conservation, calcite, RTI

O. Zaitseva, M. Vavulin, A. Pushkarev, E. Vodyasov

3D SCANNING AND TERRESTRIAL PHOTOGRAMMETRY: POSSIBILITIES OF 3D DOCUMENTING *IN SITU* FOR BURIAL COMPLEXES

In 2013–2014 modern technologies of 3D recording and documentation of excavations were involved in the cause of field works in Western Siberian burial complexes of various types. Particularly significant large-scale works were carried out on the archaeological sites of Zeleny Bor, Yamal-Nenets Autonomous District, and Timiryazev, Tomsk Region.

Applied in parallel in the project were two technologies of field recording of the burials, i.e. 3D scanning and terrestrial photogrammetry, followed by a comparative analysis of their results. Both technologies, scanning and photogrammetry, proved to provide for creating highly accurate photo-realistic 3D models of the burials. The combination of both technologies was used for the same 3D models when dealing with the burials of complex geometrical shapes.

Key words: 3D scanning, terrestrial photogrammetry, burial complexes, Western Siberia

Ключевые слова: трёхмерное сканирование, наземная фотограмметрия, погребальные комплексы, Западная Сибирь

D. Karelin

RECONSTRUCTIONS OF THE LATE ROMAN FORTRESSES IN EGYPT: EXAMPLES, PROBLEMS AND PECULIARITIES

This paper is part of the study of late Roman military architecture in Egypt. It seems that the fortresses of the late Roman period in Egypt are better preserved and have more diverse typology and more specific architectural peculiarities than earlier ones. Some of their unique features might have appeared under the influence of Egyptian architecture. The best way both to study and to show the features of explored monuments is to make their 3D reconstructions.

The main aim of the paper is to present the author's 3D reconstructions of the late Roman fortresses in Egypt and to discuss some architectural peculiarities of late Roman military architecture using their examples. The paper is accompanied with the author's reconstructions of three monuments: the temple of the Roman Imperial cult at the Luxor fortress, the late Roman fortress at Nag-el-Hagar and the fort at Dionysias in the Faiyum oasis. The first one, on the one hand, was a typical example of the Diocletianic principia, and on the other hand, it demonstrates an unexpected for this type of building connection

between Egyptian and Roman cultures. The second and third ones give an opportunity to discuss the architectural features of the late Roman walls, towers, gates, arrow slits and other elements. Furthermore, the late Roman palace at Nag-el-Hagar and principia of the last two fortresses are late antique architectural masterpieces with a number of peculiarities of particular interest.

Key words: Egypt, Rome, late Roman fortresses, 3D reconstructions, Luxor, Nag-el-Hagar, Dionysias

Ключевые слова: Египет, Рим, позднеантичные крепости, 3D-реконструкции, Луксор, Наг эль-Хагар, Дионисиас

Ф. И. Аполлонио, Ф. Фаллаволлита, Э. С. Джиованнини

ВОРОТА АУРЕА В РАВЕННЕ: ЦИФРОВАЯ ГИПОТЕЗА РЕКОНСТРУКЦИИ

В рамках тех теоретических и методологических проблем и преимуществ, которые предоставляют цифровые архивы трёхмерных моделей, важно установить новые протоколы обработки пространственных данных (поддерживающих проект виртуальной реконструкции), с помощью которых можно оценивать результаты и гарантировать абсолютную прозрачность реконструкции. Ворота Ауреа в Равенне веками привлекали внимание самых известных архитекторов. Предлагаемая виртуальная реконструкция основана на сочетании исследования реальных археологических находок и привлечения широкого круга исторических источников (рисунков, изображений, научных разработок и анализа конструкций *in situ*). Этот проект связан с рядом фундаментальных проблем, относящихся к формулировке гипотез о возможных реконструкциях. Данная работа описывает методологический приём – от сбора данных до формулирования надёжной гипотезы относительно вида и представления различных архитектурных элементов (с определённой степенью достоверности), – позволяющий принять или отклонить сделанные в ходе реконструкции допущения.

Ключевые слова: виртуальная реконструкция, трёхмерное моделирование, обследование в допустимых пределах, семантическая структура, визуализация допущений, римские ворота

Key words: virtual reconstruction, 3D modelling, range-based survey, semantic structure, uncertainty visualization, Roman gate

S. Bakhvalov, F. Malkov

ON THE DESIGN OF VIRTUAL EXHIBITIONS OF ARCHAEOLOGICAL MATERIALS

The current version of technical recommendations for virtual museums issued by the Russian Ministry for Culture includes a possibility of employing an interactive module for this type of information product which helps construct an individual virtual exhibition based on the unique scenario and a variety of digital data sources.

The Laboratory of Archaeology, Paleoecology and Life Systems of North Asian Peoples at the Institute of Cybernetics of Irkutsk State Technical University which has been doing 3D scans of archaeological finds has got a large collection of digital data in

need of systematisation and effective presentation. The absence of turnkey solutions for storage and Internet publication of complete digital models of archaeological objects (in compliance with the Laboratory's scientific tasks) has led to the development of a new software/program module that makes it possible to design a single virtual exhibition or even an entire virtual museum in a future perspective.

Key words: 3D modelling, virtual exhibition, virtual museum

Ключевые слова: 3D-моделирование, виртуальная экспозиция, виртуальный музей

A. Nikitin, A. Nikitin, A. Nikitina, N. Reshetnikova

COMPUTER RECONSTRUCTIONS OF THE YAM – YAMBURG FORTRESSES WITH INTERACTIVE IMMERSIVE TECHNOLOGIES

The paper analyzes challenges and tendencies of computer archaeological reconstructions and overviews the project "History of the Yam Fortress" as part of the program "Preservation and Use of Cultural Heritage in Russia".

The Yam fortress is a lost cultural heritage object. The aim of the project is to preserve and communicate to a wide audience information on this lost monument and thus contribute to the economic and social development of the area by encouraging "cultural tourism".

The project cites sources and methods for historical and artistic reconstructions and presents interactive 3D models of a 14th-century fortress with four towers, 15th-century fortress with nine towers and 18th-century one with bastions. These models are involved in group and individual virtual tours, free (without fixed routes) educating walks, historical games in which the users are directed in the game space as well as in expanding the museum exhibition space and territory around it by using augmented reality technology.

Key words: immersion, interaction, 3D, augmented reality, gestural interfaces, historical reconstruction, cultural heritage, cultural tourism, virtual museum, historical games

Ключевые слова: иммерсивность, интерактивность, 3D, дополненная реальность, управление жестами, исторические реконструкции, культурное наследие, культурный туризм, виртуальный музей, исторические игры

D. Bulgakov, I. Dubkov, T. Ryabkova, G. Logach, N. Reshetnikova,
N. Saveliev

INTERACTIVE COMPUTER RECONSTRUCTION OF THE RAZMENNY 1 (KOSTROMSKOY) KURGAN: AIMS, PROBLEMS, SOLUTIONS

The project "Interactive Computer Reconstruction of the Razmenny 1 (Kostromskoy) Kurgan: Aims, Problems, Solutions" has been carried out as part of the Master curriculum program "Multimedia and Computer Graphics Systems" by the Department of Computing Systems and Networks (SUAI) in collaboration with the Department of Eastern European and Siberian Archaeology (State Hermitage Museum). The project was aimed at creating an interactive multimedia application which would incorporate a 3D presentation of the

process of a Scythian kurgan construction and thus make the results of the exploration of this famous object of Scythian culture available to wider audiences.

This 3D reconstruction of different stages of a Scythian kurgan's erection (late 7th to early 6th century BC) was made possible thanks to the second session of archaeological exploration performed by the South Kuban Expedition (State Hermitage Museum).

The application soft- and hardware makes use of the 3D-engine technology widely applied in games industry and virtual reality systems.

The project can be implemented in museum space or as education resource/facility for organizing exhibitions, guided tours (on relevant subjects) and archaeological classes.

Key words: Scythian Archaic epoch, Kuban region, 3D-reconstruction of kurgan, interactivity, technologies of virtual worlds, 3D-engine

Ключевые слова: скифская архаика, Закубанье, 3D-реконструкция кургана, интерактивность, технологии виртуальных миров, технология 3D-engine

В. Барнеке Ная, Л. Хернандес Ибанес

ОТ ЦИФРОВОГО К КИБЕРПРОСТРАНСТВУ. ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ МИРОВ КАК СРЕДСТВА ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Информационные центры продуктивно решают задачу передачи сведений о культурном наследии в тех муниципальных и сельских округах, где нет ресурсов для открытия традиционного полномасштабного музея, и где историческое наследие является важным фактором развития туризма.

В отличие от традиционных музеев информационные центры обычно не занимаются сбором, хранением и изучением объектов, они специализируются на том, чтобы передать всю важность и значимость культурного наследия. Они должны выполнять обучающую функцию и повышать уровень информированности о культурном наследии.

Виртуальные пространства могут стать весьма эффективным инструментом для распространения культурного «продукта» информационных центров.

Виртуальные копии можно не просто демонстрировать отдельно, но помещать в контекст, чтобы лучше передать культурное содержание. Виртуальная среда может использоваться как для исторической реконструкции непосредственно «на месте», так и для удаленного виртуального посещения, привлекая пользователей со всего мира, тех, кто никогда не доедет до данного места в реальной жизни.

Наша работа рассказывает о создании и использовании виртуального пространства, построенного для небольшого музейно-информационного центра римской мозаики, в котором размещены фрагменты мозаик, найденных на раскопках римской виллы IV века в Казариче (Испания). Данный *domus olearia* очень точно воспроизводит то, как выглядел реальный дом. Реконструкция сделана на основе архитектурных и археологических данных, а также остатков фундамента и материалов, найденных при раскопках. В виртуальный *domus* помещено тринадцать полностью реконструированных мозаик, найденных во время раскопок и размещенных в тех комнатах, где они когда-то находились в действительности. Комнаты восстановлены в соответствии с функциональным назначением и содержат мультимедийные экспликации, рассказывающие о разных

сторонах повседневной жизни *domus olearia*. Посетители заходят в дом, выбрав один из аватаров римлянина. В виртуальное пространство могут заходить несколько посетителей одновременно. Они могут общаться и переговариваться между собой. В инсталляции есть место для кураторов, где они читают дистанционные лекции и устраивают презентации для удаленной аудитории.

Ключевые слова: виртуальный мир, средство интерпретации, римская вилла, мозаика, аватар, OpenSim

Key words: virtual world, interpretation center, Roman villa, mosaic, avatar, OpenSim

R. Podgornaya, M. Vassiliev

APPROACHES TO DESIGN OF THE GIS "ARCHAEOLOGICAL STUDY OF PSKOV" AND "OBJECTS OF ARCHAEOLOGICAL HERITAGE OF THE PSKOV REGION"

In the recent 25 years Pskov archaeologists have been actively engaging computer technologies both in field and laboratory research in the city and its region. The accumulated experience, the large amount and variety of the evidence and constantly developing software and technological resources call for new approaches to the processing and interpretation of the collected data.

GIS appears to be the most effective form of merging all the archaeological evidence. Today we can name the following favourable preconditions for its introduction:

- creation of a digital model of ancient Pskov's paleorelief;
- creation of a unified digital plan showing the location of all the archaeological sites;
- record cards of all the excavation sites with information on their location, time of excavations, total area, major results etc;
- computer archive of all the reports and major publications of the excavations' results;
- creation of a single unified system of data on more than 3,000 Objects of Archaeological Heritage in the Pskov Region, which contains their revised descriptions and GPS coordinates.

Development of GIS is the current priority of the Pskov Laboratory of Digital Archaeology.

Key words: paleorelief, record card of an excavation site, GIS, database, AutoCad, Excel, GPS

Ключевые слова: палеорельеф, карточка раскопа, ГИС, базы данных, AutoCad, Excel, GPS

M. Vavulin, O. Zaitseva, A. Pushkarev

3D DIGITIZING OF THE NAVAL DETAILS OF A «KOCH» (BOAT)

“Koch” was a pre-Petrine sail and rowing boat adapted for the severe ice conditions of the Arctic seas. Its authentic fragments discovered in Mangazeya, first Russian town built in Polar Siberia, have served as a unique source for its reconstruction. In 2014 OOO NPO “Northern Archaeology” and the Laboratory of Interdisciplinary Archaeological Research “Atreifact” (Tomsk State University) started 3D scanning of the boats’ surviving fragments and elements. There was developed a special method of scanning larger fragments (up to seven metres long) with a portable 3D optical scanner.

The final goal of the project is the complete digital 3D reconstruction of the legendary boat which can become a museum exhibit in its own right and can also serve as reliable scientific evidence for creating a replica of a “koch” and launching its experimental navigation.

Key words: pre-Petrine sail, Arctic exploration, Mangazeya, 3D scanning and modeling of the boats’ fragments

Ключевые слова: допетровское судоходство, освоение Арктики, Мангазея, 3D-сканирование и моделирование корабельных деталей

A. Leonov

3D DOCUMENTING IN A MUSEUM EXHIBITION: VIRTUAL REALITY AND WEB APPLICATIONS

A 3D model stores spatial data on the object recorded in a 3D coordinate system linked to the object. This vitally distinguishes a 3D model from drawings, sketches, plans, photos and films which feature 2D images of the object. Thus this model might be interpreted as a new type of document, i.e. 3D document.

The number of virtual 3D models of real and historical objects is dramatically increasing all over the world. As part of this process, 3D documentation of man-made and natural objects of public significance is being carried out. These 3D models (or 3D documents) become museum exhibits of a novel type which can (and should) be presented to the public.

The state has confirmed that for further development of museum activities it is very important to employ new technologies for acquisition and reproduction of virtual images. The Russian Federation President’s Decree of 7 May 2012 (No 597), “On Measures for the Implementation of the State Social Policy”, says that the Government is to create 27 virtual museums by 2018.

This paper covers two approaches to the presentation of 3D documents to wider audiences – in virtual reality systems and in Web applications. As an example it analyzes some projects implemented by the Centre of the Virtual History of Science and Technology (Institute for the History of Science and Technology of RAS), such as a virtual model of the Denisova Cave in the Altai and others.

Key words: 3D document, virtual model, virtual museum

Ключевые слова: 3D-документ, виртуальная модель, виртуальный музей

О. Хаук, П. Курочинский

ЯЗЫК МАРКИРОВКИ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ – РАЗРАБОТКА ОНТОЛОГИИ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ РЕКОНСТРУКЦИЙ

В данной работе предложена схема метаданных, так называемый «язык маркировки объектов культурного наследия», использующийся для записи цифровых реконструкций разрушенных и/или нереализованных 3D-объектов культурного наследия. Новый подход касается полной технологической цепочки реконструкции и отражает все аспекты этого сложного процесса, разнообразие использованных источников, последующую интерпретацию пространственных данных и моделирование геометрии. Применение данного языка маркировки объектов культурного наследия в доменной онтологии, соотносящееся со стандартом ISO CIDOC-CRM, открывает новые возможности для исследователей и предлагает стандартизированный формат для описания и создания перекрёстных ссылок между 3D-моделями, отвечающий возрастающим запросам семантической паутины.

Ключевые слова: цифровая реконструкция, электронная документация, схема метаданных, доменная онтология

Key words: digital reconstruction, e-documentation, metadata schema, domain ontology

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АИППЗ	Археология и история Пскова и Псковской земли
АНО	Автономная некоммерческая организация
АЦПО	Археологический центр Псковской области
БПЛА	беспилотный летательный аппарат
БС	Балтийская система высот
БД	база данных
БФАН	Башкирский филиал Академии наук
ВСЕГЕИ	Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского
ГБУК	Государственное бюджетное учреждение культуры
ГИС	Географическая информационная система
ГУАП	Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
ГЭ	Государственный Эрмитаж
ДГУ	Дніпропетровський гуманітарний університет
ИА	Институт археологии
ИА НАНУ	Институт археологии Национальной академии наук Украины
ИИЕТ РАН	Институт истории естествознания и техники Российской академии наук
ИИМК	Институт истории материальной культуры
ИИЯЛ УНЦ	Институт истории, языка и литературы Уфимского научного центра
ИрНТУ	Иркутский Национальный исследовательский технический университет
КСИА	Краткие сообщения института археологии
ЛГУ	Ленинградский государственный университет
МАрхи	Московский архитектурный институт
МТФ	многоугольная теневая фотосъёмка
НАНУ	Национальная академия наук Украины
ОКН	объект культурного наследия
ПО	программное обеспечение
РАН	Российская академия наук
РАЕ	Российский археологический ежегодник
РГО	Русское географическое общество
РГНФ	Российский гуманитарный научный фонд
РГПУ	Российский государственный педагогический университет
СА	Советская археология
САПР	система автоматизированного проектирования
УНЦ	Учебно-научный центр

LIST OF ABBREVIATIONS

3D	three dimensional
ADAM	advanced digital asset management
AMF	additive manufacturing file
AR	augmented reality
BHF	Bulkan Heritage Foundation
BLfD	Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege
CAD	computer-aided design
CARARE	connecting archaeology and architecture in EUROPEANA
CeBIT	Centrum der Büro- und Informationstechnik
CH	cultural heritage
CHML	cultural heritage markup language
CIPA	International Committee for Documentation of Cultural Heritage
CIDOC	International Committee for Documentation of the International Council of Museums
CRM	conceptual reference model
CSIC	Consejo Superior de Investigaciones Cientificas
CT	computed tomography
DAI	Deutsche Archäologische Institut
DSLR	digital single-lens reflex camera
ESA	European Space Agency
GIS	geographic information system
GPR	ground-penetrating radar
GPS	global positioning system
GSA	Geological Society of America
HP	Hewlett Packard
HSH	hemispherical harmonics
ICE	image composite editor
ICA	International Colour Authority
ICT	information communication technology
ISO	International Standards Organization
ISTRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
LIDAR (LiDAR)	remote sensing technology, the term created of “light” and “radar”
LGPL	Lesser General Public License

LMU	Ludwig Maximilian University of Munich
MDA	multiple discriminant analysis
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MMOW	massively multiplayer online world
NASA	JPL Jet Propulsion Laboratory of the National Aeronautics and Space Administration
OBJ	object file
PNG	portable network graphics
PTM	polynomial texture mapping
PWGSC	Public Works and Government Services Canada
RAM	random access memory
RAS	Russian Academy of Sciences
RGB	red green blue
RTI	reflectance transformation imaging
SIFT	Scale-invariant feature transform
STL	stereolithography
TIFF	tagged image file
VA	virtual archaeology
VE	virtual environment
VAST	Visual Analytics Science and Technology
VRE	virtual research environment
WissKI	Wissenschaftliche KommunikationsInfrastruktur
XML	extensible markup language

LIST OF AUTHORS / СПИСОК АВТОРОВ

AVTYUSHENKO Alla

*Saint Petersburg State Polytechnic University,
Russian Federation*

АВТЮШЕНКО Алла Леонидовна

*Санкт-Петербургский Государственный
политехнический университет,
РФ*

APOLLONIO Fabrizio I.

*Department of Architecture,
University of Bologna,
Italy
fabrizio.apollonio@unibo.it*

АПОЛЛОНИО Фабрицио И.

*Факультет архитектуры,
Университет Болоньи,
Италия*

ASĂNDULESEI Andrei

*Department of Interdisciplinary Research,
University of Iași, Romania /
Ludwig Maximilian University,
Germany
andrei.asandulesei@yahoo.com*

АСЭНДУЛЕЗЕЙ Андрей

*Факультет междисциплинарных
исследований, Ясский Университет,
Румыния*

ASĂNDULESEI Mihaela

*Department of History,
University of Iași,
Romania*

АСЭНДУЛЕЗЕЙ Михаэла

*Исторический факультет,
Ясский Университет,
Румыния*

BARNECHE NAYA Viviana

*University of Coruña,
Spain
viviana.barneche@udc.es*

БЕРНЕКЕ НАЯ Вивиана,

*Университет Коруньи,
Испания*

BAKHVALOV Sergei

*Institute for Cybernetics,
Irkutsk National Research
Technical University,
Russian Federation*

БАХВАЛОВ Сергей Владимирович, к. т. н.

*Институт кибернетики,
Иркутский Национальный
Исследовательский Технический
Университет,
РФ
bsv@istu.edu*

BEVAN George A.

*Queen's University,
Canada*

БИВАН Георг А.

*Королевский Университет,
Канада*

BECKER Florian

*BLfD,
Germany*

БЕКЕР Флориан

*Баварский департамент по охране
памятников,
ФРГ*

BELINSKIJ Andrej

Unitary Government Enterprise "Heritage",
Russian Federation

BUGROV Dmitry

Khalikov Institute of Archaeology,
Tatarstan Academy of Sciences,
Russian Federation

BULGAKOV Dmitry

Saint Petersburg State University of Aerospace
Instrumentation,
Russian Federation

VAVULIN Mikhail

Tomsk State University,
Russian Federation

VASILIEV Ivan

Balkan Heritage Foundation,
Bulgaria

VASSILIEV Mikhail

Archaeological Centre of the Pskov Region,
Russian Federation

VODYASOV Evgeny

Laboratory of interdisciplinary archaeological
research "Artefakt",
National Research Tomsk State University,
Russian Federation

VOSINAKIS Spyros, Ph.D.

University of the Aegean,
Greece

VOLONAKIS Pantelis

University of the Aegean,
Greece

БЕЛИНСКИЙ Андрей Борисович, к. и. н.

Унитарное Государственное
предприятие «Наследие»,
РФ

БУГРОВ Дмитрий Геннадьевич, к. и. н.

Институт археологии им. А. Х. Халикова
Академии Наук Республики Татарстан,
РФ

БУЛГАКОВ Дмитрий Алексеевич

Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения,
РФ

БАВУЛИН Михаил Викторович

Лаборатория междисциплинарных
археологических исследований
«Артефакт»,
Национальный исследовательский
Томский государственный университет,
РФ

ВАСИЛЬЕВ Иван

Фонд наследия Балкан,
Болгария

ВАСИЛЬЕВ Михаил Анатольевич

Государственное бюджетное учреждение
культуры Псковской области
«Археологический центр Псковской
области»,
РФ

ВОДЯСОВ Евгений Вячеславович, к. и. н.

Лаборатория междисциплинарных
археологических исследований
«Артефакт»,
Национальный исследовательский
Томский государственный университет,
РФ

ВОЗИНАКИС Спирос,

Эгейский университет,
Греция

ВОЛОНАКИС Пантелис

Эгейский университет,
Греция

WÄRMLÄNDER Sebastian K.T.S., Ph.D.

Division of Biophysics,
Stockholm University,
Sweden

GAYNULLIN Iskander

Khalikov Institute of Archaeology,
Tatarstan Academy of Sciences,
Russian Federation

GASS Anton

Prussian Cultural Foundation,
Germany

HOOKE Daria

State Hermitage Museum,
Russian Federation

GUSENTOVA Tatiana

ANO "Nil culturnogo i prirodnogo naslediya",
Russian Federation

DARAGAN Marina

Institute of archaeology
Ukrainian National Academy of Science,
Ukraine / DAI,
Germany

DWORAK Daniel

Justus Liebig University Giessen, Germany /
Institute of Information Technology,
Lodz University of Technology,
Poland

GIOVANNINI Elisabetta C.

Department of Architecture,
University of Bologna,
Italy

DAWSON Peter, Ph.D.

Department of Archaeology,
University of Calgary,
Canada

ВЭРМЛЭНДЕР Себастиан

Отделение биофизики,
Стокгольмский Университет,
Швеция

ГАЙНУЛЛИН Искандер Ильгизович

Институт археологии им. А. Х. Халикова
Академии Наук Республики Татарстан,
РФ
ihigh@mail.ru

ГАСС Антон

Фонд Прусского наследия,
ФРГ

ГУК Дарья Юрьевна, к. филол. н.

Государственный Эрмитаж,
РФ
hookk@hermitage.ru

ГУСЕНЦОВА Татьяна Матвеевна, к. и. н.

АНО «НИИ культурного и природного
наследия»,
РФ

ДАРАГАН Марина Николаева, к. и. н.

Институт археологии
Национальной Академии Наук Украины,
Украина / DAI,
ФРГ

ДВОРАК Даниэль

Гиссенский Университет Юстаса Либиха,
ФРГ /
Университет Лодзи,
Польша

ДЖИОВАННИНИ Элизабета

Факультет архитектуры,
Университет Болоньи,
Италия

ДОУСОН Питер

Факультет археологии,
Университет Калгари,
Канада

DUBKOV Igor

Saint Petersburg State University of Aerospace
Instrumentation,
Russian Federation

ZHUKOVSKY Mikhail

ANO "Sovremennye Technologii
v Arkheologii I Istori",
Russian Federation

ZAITSOVA Olga

Laboratory of interdisciplinary archaeological
research "Artefakt",
National Research Tomsk State University,
Russian Federation

IVANOV Vladimir

Saint Petersburg State Polytechnic University,
Russian Federation

KARELIN Dmitry

Moscow Institute of Architecture,
Russian Federation

KASIMOV Alexei

Khalikov Institute of Archaeology,
Tatarstan Academy of Sciences,
Russian Federation

KOZLOV Mikhail

ОАО "Nasledie Kubani",
Russian Federation

KULKOVA Marianna

The Herzen State Pedagogical University
of Russia,
Russian Federation

ДУБКОВ Игорь Александрович

Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения,
РФ

ЖУКОВСКИЙ Михаил Олегович

АНО «Современные Технологии
в Археологии и Истории»,
РФ
mzhukovsky@mail.ru

ЗАЙЦЕВА Ольга Викторовна, к. и. н.

Лаборатория междисциплинарных
археологических исследований
«Артефакт»,
Национальный исследовательский
Томский государственный университет,
РФ
snori76@mail.ru

ИВАНОВ Владимир Михайлович, д. т. н.

Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет,
РФ
voliva@rambler.ru

КАРЕЛИН Дмитрий Алексеевич, к. и.

Московский архитектурный институт
(Государственная академия) (МАрХИ),
РФ
dmitry.a.karelin@gmail.com

КАСИМОВ Алексей Валерьевич

Институт археологии им. А. Х. Халикова
Академии наук Республики Татарстан,
РФ

КОЗЛОВ Михаил В.

ОАО «Наследие Кубани»,
РФ

КУЛЬКОВА Марианна Алексеевна,

к. геол.-минер. н.
Российский государственный
педагогический университет
им. А. И. Герцена,
РФ

KUROCZYŃSKI Piotr, Dr.-Ing.

Herder Institute for Historical Research on East
Central Europe,
Germany
piotr.kuroczynski@herder-institut.de

KÜHNE Lena

BLfD / LMU,
Germany

LEVY Richard M., M.Arch, Ph.D.

Faculty of Environmental Design
University of Calgary,
Canada
rmlevy@ucalgary.ca

LEONOV Andrey, Ph.D.

Center for Virtual History of Science and
Technology,
S.I. Vavilov Institute for the History of Science
and Technology of the RAS,
Russian Federation

LINCK Roland, Ph.D.

BLfD / LMU,
Germany

LOGACH George

Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation,
Russian Federation

LIRITZIS Ioannis, Ph.D.

Laboratory of Archaeometry,
University of the Aegean,
Greece
liritzis@Rhodes.Aegean.gr

LUTTEROTH Jan

LMU,
Germany

КУРОЧИНСКИЙ Пётр

Гердер институт исторических
исследований Восточной Европы,
ФРГ

КЮНЕ Лена

BLfD / Университет Людвига Максимилиана,
ФРГ

ЛЕВИ Ричард

Факультет ландшафтного дизайна,
Университет Калгари,
Канада

ЛЕОНОВ Андрей Владимирович, к. ф. - м. н.

Центр виртуальной истории науки
и техники, Институт истории
естествознания и техники
им. С. И. Вавилова РАН,
РФ
a.leonov@ihst.ru

ЛИНК Роланд

BLfD / Университет Людвига Максимилиана,
ФРГ

ЛОГАЧ Георгий Константинович

Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения,
РФ

ЛИРИТЦИС Иоаннис

Лаборатория археометрии,
Эгейский университет,
Греция

ЛУТТЕРОТ Ян

Университет Людвига Максимилиана,
ФРГ

MALKOV Fedor

*Institute for Cybernetics,
Irkutsk National Research
Technical University,
Russian Federation*

MOKRUSHIN Vladimir

*ОАО "Nasledie Kubani",
Russian Federation*

NIKITIN Alexander

*VR Lab,
Russian Federation*

NIKITIN Alexander

*Laboratory of computer graphics and virtual
reality, Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation,
Russian Federation*

NIKITINA Anna

*VR Lab,
Russian Federation*

NICCOLUCCI Franco

*PIN, VAST-LAB,
Italy*

PARZINGER Hermann

*Prussian Cultural Foundation,
Germany*

PAVLIDIS George

*Research Center ATHENA,
Greece*

PAKHUNOV Alexander

*Institute of Archaeology of Russian Academy
of Science,
Russian Federation*

МАЛКОВ Фёдор Сергеевич

*Институт кибернетики,
Иркутский национальный
исследовательский технический
университет,
РФ
fmalkov@istu.edu*

МОКРУШИН Владимир Павлович

*ОАО «Наследие Кубани»,
РФ
vlmokrushin@yandex.ru*

НИКИТИН Александр Александрович

*VR Lab,
РФ*

НИКИТИН Александр Васильевич, к. т. н.

*Лаборатория компьютерной графики
и виртуальной реальности,
Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения,
РФ
guar.cgvr@gmail.com*

НИКИТИНА Анна Александровна

*VR Lab,
РФ*

НИКОЛУЧИ Франко

*Политехнический Институт, VAST-LAB,
Италия*

ПАРЦИНГЕР Герман

*Фонд Прусского наследия,
ФРГ*

ПАВЛИДИС Георг

*Исследовательский центр ATHENA,
Греция*

ПАХУНОВ Александр Сергеевич

*Институт археологии Российской
академии наук,
РФ
science@pakhunov.com*

PODGORNAYA Rosalia

*Archaeological Centre of the Pskov Region,
Russian Federation*

PUSHKAREV Andrei

*Tomsk State University,
Russian Federation*

RAYKOVSKA Miglena

*Department of Archaeology
at the New Bulgarian University,
Bulgaria
miglena.raykovska@gmail.com*

REILLY Paul

*Department of Archaeology,
University of Southampton,
UK
p.reilly@soton.ac.uk*

RESHETNIKOVA Nina

*Laboratory of computer graphics and virtual
reality, Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation,
Russian Federation*

RYABKOVA Tatiana

*State Hermitage Museum,
Russian Federation*

RYABCHUK Daria

*A.P. Karpinsky Russian Geological Research
Institute (VSEGEI),
Russian Federation*

ПОДГОРНАЯ Розалия Георгиевна

*Государственное бюджетное учреждение
культуры Псковской области
«Археологический центр Псковской
области»,
РФ
roza_podgornaya@mail.ru*

ПУШКАРЁВ Андрей Александрович

*Лаборатория междисциплинарных
исследований «Артефакт»
Национального исследовательского
Томского государственного
университета,
РФ*

РАЙКОВСКА Миглена

*Новый Болгарский университет,
Болгария*

РЕЙЛИ Пол

*Факультет археологии,
Саутгемптонский университет,
Великобритания*

РЕШЕТНИКОВА Нина Николаевна, к. т. н.

*Лаборатория компьютерной графики
и виртуальной реальности,
Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения,
РФ
guar.cgvr@gmail.com*

РЯБКОВА Татьяна Владимировна, к. и. н.

*Государственный Эрмитаж,
РФ*

РЯБЧУК Дарья Владимировна,

*к. геол.-минер. н.
Всероссийский научно-исследовательский
геологический институт
им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ),
РФ
Daria_Ryabchuk@vsegei.ru*

SAVELIEV Nikolai

*Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation,
Russian Federation*

SERGEEV Aleksander

*A.P. Karpinsky Russian Geological Research
Institute (VSEGEI),
Russian Federation*

SITDIKOV Airat

*Khalikov Institute of Archaeology,
Tatarstan Academy of Sciences,
Russian Federation*

SOROKIN Petr

*Institute for material Culture of RAS,
Russian Federation*

STAROVOITOV Alexander

*Kazan (Volga Region) Federal University,
Russian Federation*

STRELKOV Sergei

*Saint Petersburg State Polytechnic University,
Russian Federation*

USMANOV Bulat

*Kazan (Volga Region) Federal University,
Russian Federation*

FALLAVOLLITA Federico

*Department of Architecture,
University of Bologna,
Italy*

FAßBINDER Jörg, Ph.D.

*BLfD / LMU,
Germany*

САВЕЛЬЕВ Николай Владимирович

*Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения,
РФ*

СЕРГЕЕВ Александр Юрьевич

*Всероссийский научно-исследовательский
геологический институт
им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ),
РФ*

СИТДИКОВ Айрат Габитович, д. и. н.

*Институт археологии им. А. Х. Халикова
Академии наук Республики Татарстан,
РФ*

СОРОКИН Пётр Егорович, к. и. н.

*Институт истории материальной
культуры РАН,
РФ*

СТАРОВОЙТОВ Александр

*Владимирович
Казанский (Приволжский) федеральный
университет,
РФ*

СТРЕЛКОВ Сергей Васильевич

*Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет,
РФ*

УСМАНОВ Булат Мансурович

*Казанский (Приволжский) Федеральный
Университет,
РФ*

ФАЛЛАВОЛЛИТА Федерико

*Факультет архитектуры,
Университет Болоньи,
Италия*

ФАССБИНДЕР Йорг

*BLfD / Университет Людвиг
Максимилиана,
ФРГ*

HAUCK Oliver

*Technical University of Darmstadt,
Germany*

HERMON Sorin, Ph.D.

*STARC, Cyprus Institute,
Cyprus
sorin.hermon@gmail.com*

HERNÁNDEZ IBÁÑEZ Luis

*videaLAB,
University of Coruña
Spain
luis.hernandez@udc.es*

KHOLINA Anna

*Saint Petersburg State Polytechnic University,
Russian Federation*

HOFMANN Ina

*BLfD,
Germany*

CRISTI Nicu Ionut

*Interdisciplinary Research Department,
University of Iaşi,
Romania*

CHERNOVA Inna

*Kazan (Volga Region) Federal University,
Russian Federation*

SCHLAGER Stefan

*Department of Physical Anthropology,
University of Freiburg,
Germany*

SHOLTS Sabrina B., Ph.D.

*Department of Anthropology
Smithsonian Institution,
USA*

ХАУК Оливер

*Технический Университет Дармштадта,
ФРГ*

ХЕРМОН Сорин

*STARC, Кипрский институт,
Кипр*

ХЕРНАНДЕС ИБАÑЕС Луис

*videaLAB,
Университет Коруньи,
Испания*

ХОЛИНА Анна Александровна

*Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет,
РФ*

ХОФМАНН Ина

*BLfD,
ФРГ*

ХРИСТИ Нику Ионут

*Факультет междисциплинарных
исследований,
Ясский Университет,
Румыния*

ЧЕРНОВА Инна Юрьевна, к. геол.-
минер. н.

*Казанский (Приволжский) Федеральный
Университет,
РФ*

ШЛАГЕР Штефан

*Факультет физической антропологии,
Фрайбургский университет,
ФРГ*

ШОЛЬЦ Сабрина

*Факультет антропологии,
Смитсоновский Институт,
США*



СОДЕРЖАНИЕ

Д. Ю. ГУК <i>Актуальные проблемы виртуальной археологии</i>	6
P. Reilly <i>Putting the materials back into virtual archaeology</i>	12
Дополненная реальность в археологии	24
S. Hermon, F. Niccolucci <i>3D archaeology: research methodology and applicability aspects – some preliminary thoughts</i>	25
I. Liritzis, P. Volonakis <i>Cyber-archaeometry from cyber-archaeology: new dynamic in archaeometric training and research</i>	38
В. М. Иванов, С. В. Стрелков, А. А Холина, А. Л. Автюшенко <i>Виртуальные реконструкции в мультимедийных экспозициях объектов культурного наследия</i>	41
R. Levy, P. Dawson <i>Fort Conger, an interactive virtual world for exploring the science of the 19th century</i>	50
P. Kuroczyński, O. Hauck, D. Dworak, J. Lutteroth <i>Virtual museum of destroyed cultural heritage – 3D documentation, reconstruction and visualisation in the semantic Web</i>	54
Полевые исследования и компьютерная обработка данных	62
В. П. Мокрушин, М. В. Козлов <i>Применение систем автоматического проектирования в археологических исследованиях</i>	63
М. О. Жуковский <i>Использование мультироторных БПЛА и фотограмметрических технологий обработки аэрофотосъемки в современных археологических исследованиях</i>	69
J.W.E. Faßbinder, A. Gass, I. Hofmann, A. B. Belinskij, H. Parzinger <i>Early Iron Age kurgans and their periphery: Latest findings and interpretations from the Northern Caucasus</i>	81
A. Asăndulesei, N. I. Cristi, M. Asăndulesei <i>Archaeological prospection and natural risk management in prehistoric sites from Eastern Romania. A case study: settlement from Costești, Cier (Iași county, Romania)</i>	89

Д. Г. Бугров, И. И. Гайнуллин, А. В. Касимов, А. Г. Ситдилов, А. В. Старовойтов, Б. М. Усманов, И. Ю. Чернова <i>Комплексный подход при сборе информации для визуализации историко-культурного наследия острова-града Свияжск</i>	104
П. Е. Сорокин, А. Ю. Сергеев, Т. М. Гусенцова, Д. В. Рябчук, М. А. Кулькова <i>Палеоландшафт береговой зоны Литоринового моря в районе археологического памятника Охта 1</i>	112
Обработка данных и компьютерное моделирование в археологии	126
М. Н. Дараган <i>Опыт 3D-моделирования курганных сооружений эпохи энеолита – ранней бронзы</i>	127
M. Raykovska, I. Vasiliev, G.A. Bevan <i>Integration of different computational photographic modalities in high-accuracy 3D building models: the case of the Church of St. Petka, Bulgaria</i>	139
L. Kühne, J.W.E. Faßbinder, R. Linck, F. Becker <i>The Roman countryside of Northwestern Noricum and the discovery of new Roman village</i>	158
S.K.T.S. Wärmländer, S.B. Sholts, S. Schlager <i>Conventional and elliptic Fourier transforms as mathematical tools for morphological classification</i>	162
А. С. Пахунов <i>Использование многоугольной теневой фотосъёмки для фиксации состояния сохранности и следов реставрации палеолитической живописи (на примере Каповой пещеры)</i>	171
О. В. Зайцева, М. В. Вавулин, А. А. Пушкарёв, Е. В. Водясов <i>Трёхмерное сканирование и наземная фотограмметрия: возможности 3D-фиксации погребальных комплексов in situ</i>	177
Реконструкции и визуализации в виртуальном пространстве	180
Д. А. Карелин <i>Реконструкции позднееримских крепостей в Египте: примеры, проблемы и особенности</i>	181
F.I. Appolonio, F. Fallavollita, E.C. Giovannini <i>Porta Aurea in Ravenna: a digital hypothetical reconstruction</i>	189
С. В. Бахвалов, Ф. С. Малков <i>О создании виртуальных экспозиций археологического материала</i>	195
А. А. Никитин, А. В. Никитин, А. А. Никитина, Н. Н. Решетникова <i>Компьютерные реконструкции крепостей Яма – Ямбурга на основе технологий интерактивного погружения</i>	199
Д. А. Булгаков, И. А. Дубков, Г. К. Логач, Н. Н. Решетникова, Т. В. Рябкова, Н. В. Савельев <i>Интерактивная компьютерная реконструкция 1-го Разменного (Костромского) кургана: задачи, проблемы, решения</i>	208

3D-документы: доступность метаданных виртуального окружения	214
V. Barneche Naya, I. Hernández Ibáñez <i>From the dig to the cyberspace. A case study of virtual worlds as a tool for interpretation centers</i>	215
Р. Г. Подгорная, М. А. Васильев <i>Предпосылки создания ГИС «Археологическое изучение Пскова» и «Объекты археологического наследия Псковской области»</i>	226
М. В. Вавулин, О. В. Зайцева, А. А. Пушкарёв <i>Трёхмерное сканирование и моделирование корабельных деталей коча</i>	234
А. В. Леонов <i>3D-документы в музейной экспозиции: виртуальная реальность и веб-приложения</i>	240
O. Hauck, P. Kuroczyński <i>Cultural Heritage Markup Language – designing a domain ontology for digital reconstructions</i>	250

SUMMARIES	257
------------------	-----

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	274
--------------------------	-----

LIST OF ABBREVIATIONS	275
------------------------------	-----

LIST OF AUTHORS / СПИСОК АВТОРОВ	277
---	-----

Программа «Музейный десант» направлена на внедрение и продвижение новых профессиональных стандартов и инновационных подходов в музейном деле; создание условий для обмена опытом и технологиями; укрепление связей внутри профессионального сообщества; развитие сотрудничества и партнерских связей между музеями и организациями из других областей профессиональной деятельности.

**БЛАГОТВОРИТЕЛЬНЫЙ
ФОНД В. ПОТАНИНА**



Since 2015 the Vladimir Potanin Foundation has launched the “Museum landing” aimed to adopt and implement new professional standards and innovation approaches in museum activities, to create conditions for experience and technologies exchange, to develop collaboration and partnership between museums and other professional institutions.

Научное издание

ВИРТУАЛЬНАЯ АРХЕОЛОГИЯ

(эффективность методов)

Материалы конференции

Редактор русского текста А. А. Золотова

Корректор русского текста Н. И. Концевая

Перевод резюме: Ю. Р. Редькина, Д. Ю. Гук

Редактор английского текста Ю. Р. Редькина

Макет и вёрстка: Н. В. Сочинская

Обработка иллюстраций: И. В. Бондарь

Издательство Государственного Эрмитажа
190000, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 34

Подписано в печать 11.04.2015. Формат 70×100 1/16

Усл. печ. л. 27,57.

Тираж 500 экз. Заказ 31.

Отпечатано в типографии Государственного Эрмитажа
190000, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 34