

УДК 902.4+004.946

**А.В. Леонов<sup>1</sup>, М.Н. Аникушкин<sup>2</sup>, А.Е. Бобков<sup>1</sup>, И.В. Рысь<sup>2</sup>,  
М.Б. Козликин<sup>3</sup>, М.В. Шуньков<sup>3</sup>, А.П. Деревянко<sup>3</sup>, Ю.М. Батурич<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН  
Старопанский пер., 1/5, Москва, 109012, Россия

E-mail: a.leonov@ihst.ru; alexander.e.bobkov@gmail.com; baturin@ihst.ru

<sup>2</sup>ООО «Триметари»

ул. Кронверкская, 5, оф. 250, Санкт-Петербург, 197101, Россия

E-mail: amn@trimetari.com; riv@trimetari.com

<sup>3</sup>Институт археологии и этнографии СО РАН

пр. Академика Лаврентьева, 17, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: kmb777@yandex.ru; shunkov@archaeology.nsc.ru;

derev@archaeology.nsc.ru

## СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ 3D-МОДЕЛИ ДЕНИСОВОЙ ПЕЩЕРЫ\*

*В статье представлены основные итоги реализации проекта «Виртуальная Денисова пещера на Алтае», целью которого являлось создание виртуальных 3D-моделей пещеры и некоторых наиболее характерных находок, а также разработка программного обеспечения для интерактивной визуализации результатов археологических исследований в виртуальном пространстве модели. Помимо сохранения информации об уникальном природном и археологическом объекте, виртуальная 3D-модель Денисовой пещеры предназначена для решения ряда научно-практических задач. Проект является первым отечественным опытом виртуального 3D-моделирования пещерной палеолитической стоянки.*

Ключевые слова: виртуальная археология, лазерное сканирование, 3D-модель, визуализация, Денисова пещера, палеолит.

### Введение

В настоящее время одним из наиболее перспективных археологических объектов для изучения древнейшей культуры человека и окружающей его природной среды на территории Северной Евразии является многослойная палеолитическая стоянка в Денисовой пещере на северо-западе Горного Алтая. В колонке рыхлых отложений пещеры выделено более 20 литологических слоев, которые содержат археологический материал различных эпох – от среднего палеолита до позднего Средневековья. Коллекция находок из цент-

рального зала, двух галерей и с предвходовой площадки пещеры насчитывает десятки тысяч предметов. Наиболее важные открытия связаны с изучением палеолитических слоев Денисовой пещеры. Научной сенсацией мирового уровня стали антропологические останки ранее неизвестного науке подвида человека, обнаруженные в слое начальной стадии верхнего палеолита.

Несомненную важность и актуальность представляет сохранение информации о Денисовой пещере как уникальном природном и археологическом объекте с использованием всего арсенала современных компьютерных методов, в частности, создание ее виртуальной (цифровой, компьютерной) 3D-модели.

Термин «виртуальная археология» ввел в научный оборот в 1990 г. П. Рейли, один из пионеров применения компьютерного 3D-моделирования и визуализации для изучения археологических объектов [Reilly, 1990]. В число основных задач данного направления

\* Публикация подготовлена при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ (постановление № 220), полученного ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет» (проект № 2013-220-04-129 «Древнейшее заселение Сибири: формирование и динамика культур на территории Северной Азии»).

входят фиксация информации об объектах исследования (3D-документирование), их виртуальная реконструкция, визуальный анализ данных и проверка гипотез, обеспечение широкого доступа к этой информации, создание виртуальных музеев. Более 20 лет виртуальная археология активно развивается в мире. Регулярно проводятся крупные международные конференции по этой тематике\*, статьи о выполненных проектах публикуются в ведущих научных журналах\*\*. Общее число созданных 3D-моделей археологических объектов измеряется тысячами [Bawaaya, 2010; Бородкин, Жеребятьев, 2012].

Как отдельное направление виртуальной археологии можно рассматривать 3D-моделирование пещерных палеолитических стоянок с использованием лазерного сканирования. Одна из первых работ такого рода выполнена в 1994 г. Лазерный сканер был применен для создания текстурированной 3D-модели труднодоступной пещеры Коске во Франции [Thibault, 2001]. В дальнейшем были созданы 3D-модели пещер Араго во Франции, Гротта-деи-Церви в Италии, Парпальо [Lerma et al., 2010], Альтамира [Donelan, 2002], Лас-Калдас, Пенья-де-Кандамо [González-Aguilera et al., 2009] в Испании, Вондерверк в Южной Африке [Rüther et al., 2009]. Детальный обзор проектов по моделированию пещерных палеолитических объектов показал, что основная мотивация большинства работ – сохранение трехмерной информации о наскальных рисунках и гравировках в пещерах. Гораздо меньше внимания уделяется визуализации археологических находок в виртуальном пространстве созданных

\*EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage – Семинар по графике и культурному наследию Европейской ассоциации по компьютерной графике; International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST) – Международный симпозиум по виртуальной реальности, археологии и культурному наследию; International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM) – Международная конференция по виртуальным системам и мультимедиа; 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (3D-ARCH) – Международный семинар «Трехмерная виртуальная реконструкция и визуализация сложных архитектурных сооружений» Международного общества по фотограмметрии и дистанционному зондированию; Electronic Imaging & the Visual Arts (EVA) – Международная конференция «Электронные изображения и визуальные искусства»; Международная конференция «Археология и геоинформатика» (АГИС); Международная конференция «Виртуальная археология» (Государственный Эрмитаж).

\*\*Journal of Cultural Heritage; Virtual Reality; IEEE Computer Graphics and Applications; The Photogrammetric Record; Sensors; ISPRS Archives; IEEE Multimedia; Journal on Computing and Cultural Heritage; Science and Technology for Cultural Heritage; Applied Geomatics; Remote Sensing.

3D-моделей. Такая задача была в полном объеме реализована в проекте «Виртуальная Денисова пещера на Алтае»\*, который является первым отечественным опытом виртуального 3D-моделирования пещерной палеолитической стоянки.

### Виртуальная 3D-модель Денисовой пещеры

В августе 2012 г. были выполнены лазерное сканирование и детальная фотосъемка пещеры. Сделано 37 сканов, полное облако точек – ок. 50 млн. Затем по результатам лазерного сканирования и фотосъемки была создана текстурированная полигональная модель. Она содержит 88 254 полигона, из них 86 000 занимает непосредственно пещера, 2 254 приходится на искусственные объекты (настилы, перила, лестницы). Разрешение текстуры составляет для разных участков от 30 до 100 тыс. пикселей на 1 м<sup>2</sup> поверхности модели. Таким образом, была создана детальная 3D-модель пещеры, которая фиксирует ее геометрию и внешний вид с высокой точностью (рис. 1).

Созданная 3D-модель была привязана к археологической системе координат (АСК), используемой в процессе раскопок для фиксации местоположения находок. Ось ординат (Y) АСК повернута на 62° по часовой стрелке относительно направления на север по истинному меридиану, примерно совпадает с линией входа в пещеру и длинной осью центрального зала. Ось абсцисс (X) перпендикулярна оси ординат в плоскости, касательной к Земле в начале координат. Ось аппликат (Z) направлена вертикально вверх, дополняет систему координат до правой тройки. Началом координат АСК является условная точка в пространстве, расположенная неподалеку от капельной линии пещеры. АСК зафиксирована на объекте при помощи серии реперов, закрепленных в коренной стенке пещеры. Все реперы были отсняты в ходе сканирования. При обработке данных модель пещеры была переведена в координаты АСК, точность привязки составила ок. 5 см (рис. 2). Таким образом, обеспечена возможность сопоставления созданной 3D-модели с археологическими схемами и непосредственного переноса массива имеющихся археологических данных в ее виртуальное пространство (рис. 3).

Отдельно были проведены лазерное сканирование, фотосъемка и 3D-моделирование нескольких

\*Проект выполнен Центром виртуальной истории науки и техники Института истории естествознания и техники РАН совместно с Институтом археологии и этнографии СО РАН при поддержке ООО «Триметари» в рамках Целевой программы РАН «Развитие постоянно действующей выставки достижений РАН» 2012 г.



а



б



в

Рис. 1. Текстурированная полигональная 3D-модель Денисовой пещеры.  
а, б – предходовая часть; в – центральный зал.

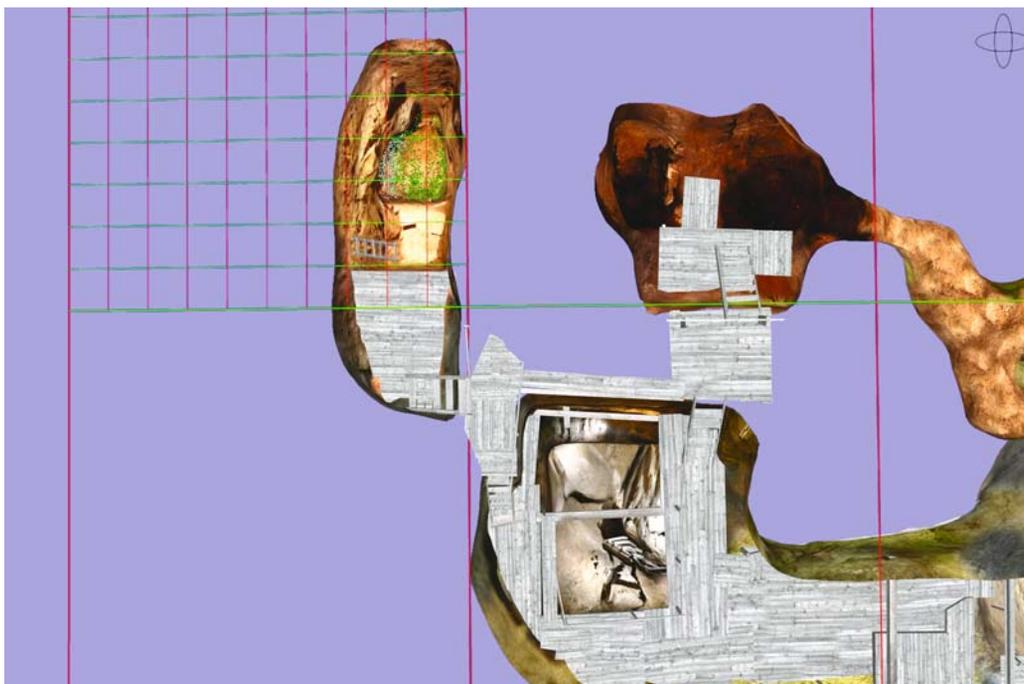


Рис. 2. Срез 3D-модели пещеры на уровне 0 м с наложением координатной сетки.



Рис. 3. Визуализация расположения находок в виртуальном пространстве 3D-модели.

образцов каменных орудий (рис. 4), маркирующих различные культурно-хронологические этапы заселения пещеры. Созданные модели предметов содержат порядка 50 тыс. полигонов. При их текстурировании использованы карты смещений, полученные по более высокополигональным моделям (500 тыс.

полигонов на предмет). Таким образом, достигнута высокая визуальная реалистичность и детальность виртуальных предметов при относительно небольшом объеме модели и текстуры, что особенно важно для задач интерактивной визуализации в стереорежиме.



Рис. 4. Текстурированные полигональные 3D-модели каменных артефактов.

*а* – скребло (слой 12); *б* – леваллуазское острие (слой 11).

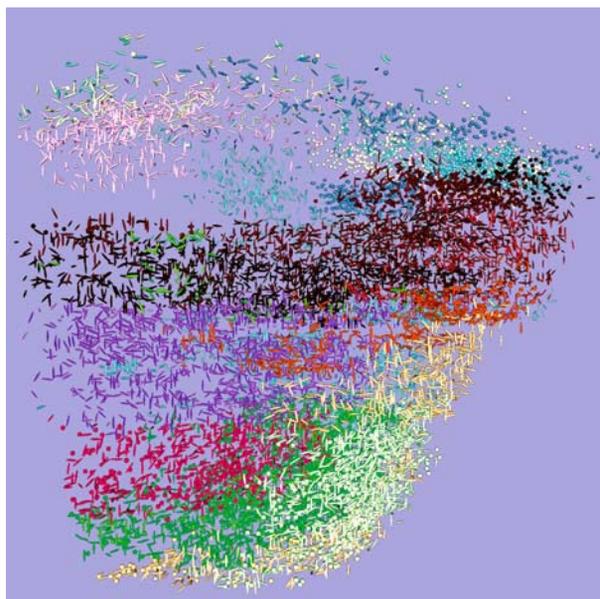


Рис. 5. «Облако находок» в раскопе восточной галереи.

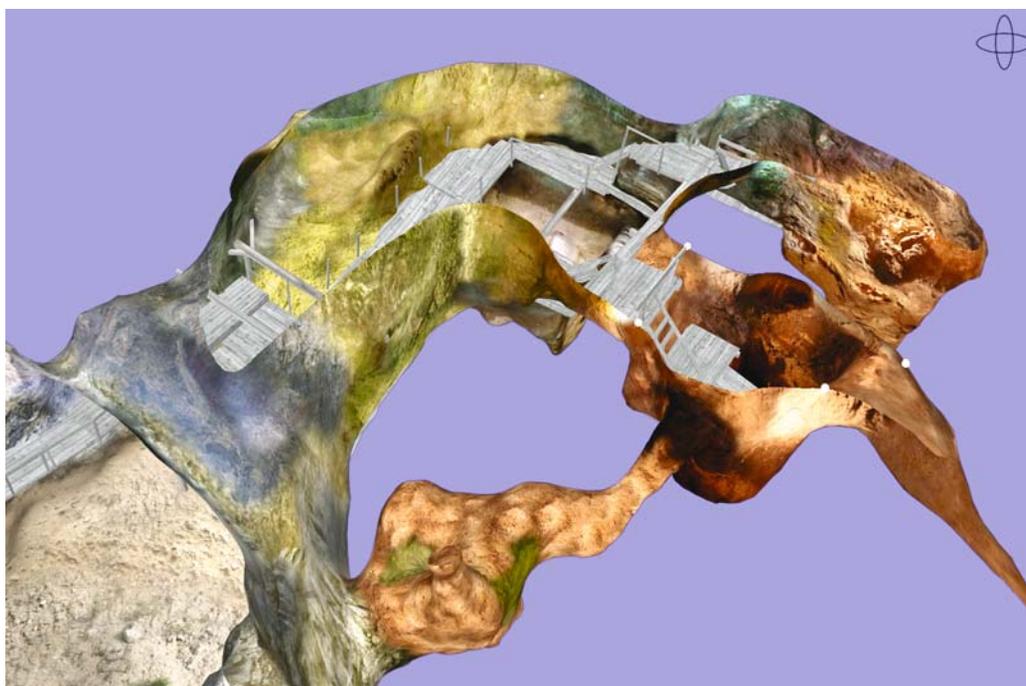


Рис. 6. Срез 3D-модели пещеры на уровне +1 м.

Для визуализации созданной 3D-модели пещеры была разработана интерактивная 3D-презентация (программное обеспечение). Она поддерживает как моно-, так и стереорежим отображения и обеспечивает визуализацию облака точек, 3D-моделей пещеры, находок, деревянных настилов, перил и лестниц, пространственного расположения находок в различ-

ных археологических горизонтах (рис. 5), а также дополнительных данных: ориентации по сторонам света осей и сетки АСК, местоположения реперов. Реализована возможность горизонтального среза виртуальной модели на любом уровне для удобства визуального анализа геометрии пещеры и расположения находок (рис. 6).

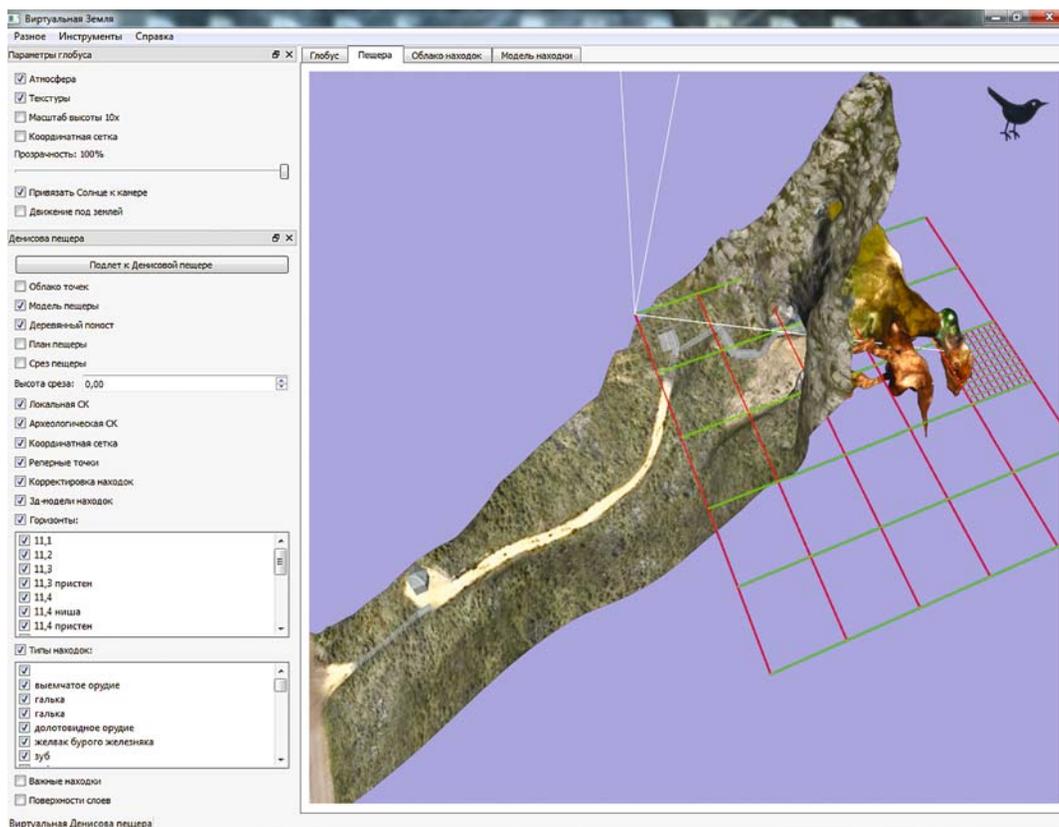


Рис. 7. Интерфейс презентации. Окно «Пещера».

В презентации предусмотрены четыре окна. Пользователь может переключаться с одного на другое в произвольном порядке. В окне «Глобус» отображается виртуальный глобус с трехмерной моделью пещеры – таким образом, можно изучить расположение пещеры на местности и окружающий рельеф. В окне «Пещера» (рис. 7) отображаются модели пещеры и других объектов. 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.

### Заключение

Созданные 3D-модель Денисовой пещеры и программное обеспечение могут использоваться для решения различных научных задач. В частности, функция горизонтальных срезов с шагом в 10 см позволяет вычерчивать точнейшие планы всей карстовой полости или ее определенного участка на любой высотной отметке. Могут быть также созданы вертикальные сечения пещеры, рассчитаны объемы и измерены расстояния между объектами внутри нее. Модель может использоваться для уточнения существующих археологических схем и создания новой топографической основы. Модель позволяет визуализировать взаиморасположение литологических слоев. Широкий набор фильтров в базе данных по находкам предоставляет возможность быстрого поиска любого интересующего артефакта (или группы находок) и установления его расположения в слое относительно других объектов. Существенным дополнением является возможность визуализации и анализа горизонтальной и вертикальной ориентации находки в слое. Модель позволяет выполнять планиграфический анализ в любом масштабе – от квадрата до сектора или пещеры в целом. Также 3D-модель может быть адаптирована для просмотра через интернет, выложена на общедоступный сайт для создания виртуальной экскурсии. Это особенно актуально для Денисовой пещеры, которая является достаточно труднодоступным для посещения объектом.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность С. Байковой, А. Иванову, Д. Линовскому (ООО «Триметари») за участие в работах по лазерному сканированию и созданию 3D-моделей, а также С. Котельникову (ООО «Навгеоком») за консультации по методике работ.

## Список литературы

**Бородкин Л.И., Жеребятъев Д.И.** Технологии 3D-моделирования в исторических исследованиях: от визуализации к аналитике // Историческая информатика. – 2012. – № 2. – С. 49–63.

**Bawaya M.** Virtual Archaeologists Recreate Parts of Ancient Worlds // Science. – 2010. – Vol. 327, N 5962. – P. 140–141.

**Donelan J.** Making Prehistory // Computer Graphics World. – 2002. – Vol. 25, N 3. – P. 32–33.

**González-Aguilera D., Muñoz-Nieto A., Gómez-Lahoz J., Herrero-Pascual J., Gutierrez-Alonso G.** 3D Digital Surveying and Modelling of Cave Geometry: Application to Paleolithic Rock Art // Sensors. – 2009. – N 9. – P. 1108–1127.

**Lerma J., Navarro S., Cabrelles M., Villaverde V.** Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study // J. of Archaeol. Sci. – 2010. – Vol. 37, N 3. – P. 499–507.

**Reilly P.** Towards a virtual archaeology // Computer Applications in Archaeology / eds. K. Lockyear, S.P.Q. Rathetz. – Oxford: Archaeopress, 1990. – P. 133–139. – (BAR Int. Ser.; N 565).

**Rüther H., Chazan M., Schroeder R., Neeser R., Held C., Walker S.J., Matmon A., Horwitz L.K.** Laser scanning for conservation and research of African cultural heritage sites: the case study of Wonderwerk Cave, South Africa // J. of Archaeol. Sci. – 2009. – Vol. 36, N 9. – P. 1847–1856.

**Thibault G.** 3D modeling of the Cosquer cave by laser survey // International newsletter on rock art. – 2001. – N 28. – P. 25–29.

*Материал поступил в редколлегию 11.02.14 г.*