

Сюткина Т.А., Галеев Р.М.

ИЭА РАН им. Н.Н. Миклухо-Маклая РАН, Ленинский проспект, 32а, Москва, 119334
E-mail: syuttaya@gmail.com (Сюткина Т.А.); ravil.galeev@gmail.com (Галеев Р.М.)

ЦИФРОВЫЕ КОПИИ ДЛЯ АНТРОПОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ: ВИРТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ

Статья посвящена описанию разных категорий цифровых копий антропологических материалов и методов их получения. Приводятся основные подходы к оценке качественных и количественных характеристик цифровых моделей. Основная часть статьи содержит информацию о существующих базах виртуальных данных для палеоантропологических исследований. Публикация носит обзорный характер, ее основная цель — структурировать информацию о виртуальных палеоантропологических коллекциях.

Ключевые слова: виртуальная антропология, сканирование поверхности, компьютерная томография, микрофотография, фотограмметрия, цифровые базы данных.

Введение

В 2001 г. в знаковой статье «Виртуальная антропология: призыв к гласности в палеоантропологии» [Weber, 2001] было высказано предложение создать общую базу данных для специалистов в области физической антропологии по примеру базы Human Genome Project, объединившей данные исследований 2800 ученых-генетиков со всего мира [<https://www.genome.gov/human-genome-project> (дата обращения: 10.12.20)]. Поддержка учеными подобного предложения понятна, если принять во внимание преимущества этого подхода:

- постоянный доступ к материалам исследования из любой точки мира;
- возможность для международной группы исследователей работать над одними и теми же материалами одновременно [Bastir, 2019; Berger et al., 2015];
- неинвазивное исследование внутренних структур, толщины тканей, мумифицированных объектов;
- обеспечение резервной сохранности оригиналов [Profico et al., 2018];
- возможность применения к виртуальным копиям современных методов изучения (геометрическая морфометрия) и моделирования (восстановление поврежденных и деформированных фрагментов) [Buonomarici et al., 2018];
- доступность результатов изучения виртуального объекта (метрических и неметрических данных) для верификации другими исследователями.

Однако идея создания единой базы виртуальных палеоантропологических данных по унифицированным протоколам выглядит труднореализуемой в ближайшие десятилетия, и препятствуют этому не объективные технические трудности, а субъективное отношение ученых к своему исследовательскому полю. Настоящая публикация представляет собой небольшой обзор существующих хранилищ цифровых данных как примеров реализации удаленного сетевого доступа к коллекциям палеоантропологических материалов.

Способы получения и верификации цифровых копий

Цифровые копии — это набор цифровых данных о форме и структуре объекта, т.е. исходные данные, получаемые в результате сканирования в виде цифровых значений (координаты точек, значения радиологической плотности и т.д.). Цифровые копии объектов могут быть созданы способами, различающимися как по сложности и стоимости реализации, так и по свойствам полученных результатов [White et al., 2018].

Общепринятых способов и протоколов для виртуальных моделей в физической антропологии на данный момент не существует [Hassett, 2018]. В целом все технические средства получения виртуальных моделей можно разделить на сканирование *поверхности* (shape) и на сканирование всей *формы* (form).

Сканирование поверхности

Трехмерное сканирование поверхности (3DSS) — широкое понятие, включающее технически разнообразные способы получения копии, от использования фотоаппаратов до применения

сверхточного дорогостоящего оборудования. Самым доступным и распространенным методом считается фотограмметрия: получение объемной модели поверхности путем «склейки» множества двумерных изображений объекта, сделанных под разным углом. В узком смысле под фотограмметрией понимают создание модели при помощи снимков, сделанных на фотоаппарат, и дальнейшего использования специализированного программного обеспечения для создания трехмерной модели. Подробный разбор нюансов фотограмметрии для копирования черепа и обзор доступного программного обеспечения (ПО) исчерпывающе представлен в статье в блоге Сисеро Мораэс [<https://arc-team-open-research.blogspot.com/2016/12/comparing-7-photogrammetry-systems.html>] (дата обращения: 10.09.20)].

Из специализированного оборудования для получения 3D-копий используют различные виды 3D-сканеров — оптические, лазерные или сложные комбинированные системы [Knyaz et al., 2012]. Одного предпочтительного варианта для сканирования скелетных останков нет, и в разных публикациях по-разному оцениваются качественные и количественные характеристики модели и возможности конкретных сканеров [Mathys et al., 2013; Slizewski et al., 2010]. Большинство сравнений прямых инструментальных линейных и угловых измерений черепа и 3D-модели показывает допустимую ошибку измерений [Katz, Friess, 2014; Knyaz et al., 2018; Park et al., 2006; Richtsmeier et al., 1995; Sholts et al., 2010]; сравнение данных, полученных с помощью контактного сканера и на виртуальных моделях, также демонстрирует сходные измерения [Barbeito-Andrés et al., 2012], при этом ландмарки III типа — краевые ограничивающие точки, например глабелла [Васильев и др., 2018, с. 46; Bookstein, 1991], точнее определяются по 3D-моделям [Richard et al., 2014; Sholts et al., 2011]. В целом если говорить о морфометрии черепа, то для поверхностного сканирования показана возможность получения надежных и повторяемых краниометрических данных.

Понятие «точность» в поверхностном сканировании отражает совокупность таких понятий, как разрешение, шум, детализация, текстура поверхности объекта. Для антропологических объектов принципиальным является значение разрешения (resolution) сканера, т.е. размер наименьшей структуры, которая может быть отсканирована. Чем выше это значение, тем выше детализация 3D-модели (видимость таких структур, как край грушевидного отверстия, подносовой шип, морфологии зубов и пр.). Достаточным разрешением сканера для краниометрических исследований считается 0,05 мм и выше. Полноценный одонтологический анализ возможен при разрешении не менее 0,01 мм.

Томографическое сканирование

Для сканирования всей формы (form) объекта применяют различные томографы, как правило, на основе рентгеновского излучения. Структура трехмерного объекта реконструируется путем соединения серии послойных срезов. Получаемые в результате модели предоставляют исследователю возможность изучить всю форму объекта, включая скрытые структуры.

Не вдаваясь в запутанную классификацию современных томографов, их можно разделить на три большие группы: медицинские томографы, микротомографы и промышленные томографы на различных источниках излучения.

В антропологических исследованиях наиболее обширные данные были получены с помощью медицинских томографов различного класса с разрешением вокселя от 1,25 до 0,6–0,5 мм для мультidetекторной компьютерной томографии (МДКТ), но более качественные модели получаются с помощью конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ) с размерами вокселя от 0,2–0,1 мм [Васильев и др., 2016; Baumgaertel et al., 2009; Berco et al., 2009; Kamburoğlu et al., 2011]. Впервые компьютерная томография для палеоантропологического исследования была применена в 1984 г. [Conroy, Vannier, 1984].

Для получения палеоантропологических данных принципиально важными характеристиками томографа являются пространственное разрешение вокселя и проникающая способность излучения. Компьютерная микротомография, или мКТ, работает по тому же принципу, что и обычная КТ, но имеет пространственное разрешение от 0,01 мм и выше. В антропологии мКТ используется для изучения внутренней структуры тканей, небольших поверхностных структур, одонтологического материала и т.д. [Kuhn et al., 1990; Rühli et al., 2007].

Способы получения цифровой копии

От способа, которым получены цифровые копии объектов, напрямую зависят их качественные и количественные характеристики и соответственно их научно-исследовательский потен-

циал. Поверхностное сканирование позволяет получать относительно дешевые и быстрые копии высокого разрешения. С помощью таких копий можно эффективно реализовывать ограниченный круг научных операций, трудно- или неосуществимых при работе с оригинальным объектом (снятие специфических размеров, исправление посмертной деформации, осуществление запротоколированных измерений, 3D-печать для получения твердотельных копий и т.д.).

С этой точки зрения сканирование всей формы (томография) имеет более высокий научный потенциал по сравнению с поверхностным сканированием, потому что дает возможность получать принципиально другие данные, которые недоступны при изучении оригинального объекта или его модели, полученной путем поверхностного сканирования. Однако и этот метод имеет ряд недостатков и ограничений. Одним из них является отсутствие информации о текстуре и цвете поверхности оригинального объекта, однако эта проблема может быть решена путем комбинирования КТ с фотограмметрией [Новиков и др., 2018]. Другой недостаток — потенциальный вред, наносимый рентгеновским излучением, которое может оказывать влияние на количество эндогенной ДНК, содержащейся в кости [Grieshaber et al., 2008; Immel et al., 2016]. Некоторые исследования не обнаруживают этой связи при использовании обычных протоколов КТ-сканирования, однако предупреждают о необходимости дальнейших исследований и вдумчивого подхода к облучению древних и особо ценных объектов [Hall et al., 2015].

Качественные и количественные характеристики 3D-моделей

Количественные характеристики модели — это разрешение, количество и геометрия полигонов, которыми описывается поверхность или форма объекта. Количественные характеристики дают приблизительное представление о ее качестве, но являются скорее ориентиром, чем точным показателем. Так, само по себе большое количество полигонов не всегда свидетельствует о высоком качестве модели — оно должно быть соразмерно задачам исследования, а неоправданно большое их количество приводит к увеличению размера файла и усложняет работу с ним.

Качественные характеристики модели — это, во-первых, соответствие копии оригиналу (условная характеристика, которая определяется через «золотой стандарт») и, во-вторых, повторяемость, т.е. близость друг к другу разных копий. Золотым стандартом может выступать копия, полученная с использованием сканера с более высоким разрешением [Park et al., 2006; Richard et al., 2014] или физические измерения оригинала при помощи краниологических инструментов [Lorkiewicz-Muszynska et al., 2015].

Схема получения 3D-моделей для поверхностного и томографического сканирования отличается, но в общем виде выглядит следующим образом. В процессе сканирования получают исходные данные, которые затем используются для создания модели; на этапе моделирования удаляются шумы и заполняются пустоты. Затем модель оптимизируется: удаляется информация, не влияющая на ее качество, с целью уменьшения ее размера и облегчения дальнейшей работы с моделью. Соответственно качество итоговой модели может зависеть от целого ряда факторов: тип и свойства сканирующего устройства, факторы, связанные с самим процессом сканирования (квалификация оператора, положение объекта, условия среды, настройки устройства), тонкости постобработки модели (сглаживание, заполнение пропусков, оптимизация и т.д.), используемое ПО [Callieri et al., 2011; Friess, 2012; Kullmer, 2008].

Существует различие в принципах создания объемной модели при использовании двух методов: при поверхностном сканировании объем реконструируется на основе отраженного света или лазерного луча, а при использовании томографических данных реконструкция объема основана на рентгенологической плотности ткани. Соответственно точность 3D-модели из КТ-данных будет дополнительно зависеть, во-первых, от расстояния между послойными срезами, а во-вторых, от алгоритма, который используется при построении модели. Возможно, именно это различие объясняет, почему при некоторых исследованиях свойств 3D-моделей, полученных разными способами, отмечается более низкая повторяемость результатов томографического сканирования [Fahrni et al., 2017; Kulczyk et al., 2019; Richard et al., 2014].

В целом при определении приемлемого для исследования качества модели важно понимать, что ни одна созданная современными способами виртуальная копия не удовлетворит 100 % возможных исследовательских потребностей, особенно если учитывать стоимость ее получения и время создания и обработки модели. Поэтому при использовании моделей необходимо учитывать их количественные и качественные характеристики, способ их получения и соотносить их с задачами исследования.

Обзор баз данных

Базы данных различаются по способу организации, содержанию, условиям предоставления доступа. Для простоты навигации основные характеристики каждой описываемой базы суммированы в табл. 1, а текст далее содержит более подробную информацию.

Краткая информация о базах цифровых данных для антропологических исследований

Summary of key information about digital anthropological databases

Название	Научная область	Тип данных	Общее количество объектов	Доступ
Цифровая палеоантропологическая коллекция НИИ и Музея антропологии МГУ	Палеоантропология	DICOM-данные и модели на основе сканирования поверхности	~300	По запросу на официальный адрес НИИ и Музея антропологии МГУ
Цифровая палеоантропологическая коллекция ИЭА РАН	Палеоантропология	Модели на основе сканирования поверхности, КТ, фотограмметрии	~100	По запросу на официальный адрес ИЭА РАН
digital @rchive	Антропогенез	Данные КТ-сканирования	13	Платный
NESPOS	Антропогенез, археология, приматология	Модели на основе сканирования поверхности, КТ и мКТ	Постоянно пополняемая	Через оплачиваемое членство
PRIMO	Приматология	Координаты точек в трехмерном пространстве	> 6500	по запросу
Smithsonian 3D Collection	Археология, зоология, приматология, антропогенез	Модели на основе сканирования поверхности и КТ	67	Только просмотр (археология и антропология)
ORSA	Палеоантропология	Модели на основе КТ	>1800	По запросу
Casa del Mendrugo	Палеоантропология	Модели на основе сканирования поверхности	10	Только просмотр
AO Research Institute	Современное население	Модели на основе КТ	>370	По запросу
La craneoteca del Departamento de Prehistoria y Arqueología de la UGR	Антропогенез	Модели на основе сканирования поверхности	23	Только просмотр
North Carolina School of Science and Mathematics	Антропогенез, современное население, приматология	Модели на основе сканирования поверхности	~60	Только просмотр
Digitized Diseases	Судмедэкспертиза	Модели на основе сканирования поверхности и КТ, рентген-снимки	>1600	Свободный для некоммерческого использования
DITSONG — CT Archive	Антропогенез	Модели на основе сканирования поверхности и мКТ	30	По запросу
Wellesley College Anthropology Department	Антропогенез	Модели на основе сканирования поверхности	282	Только просмотр
African Fossils	Археология, антропогенез	Модели на основе сканирования поверхности и фотограмметрии	180	Свободный
The Visible Human Project	Анатомия	КТ- и МРТ-снимки, криосекции	2 индивида	Свободный
MorphoSource	Зоология, приматология, антропогенез, палеоантропология, палеопатология, современное население	Модели на основе сканирования поверхности, КТ и мКТ, изображения	Постоянно пополняемая (>700 объектов)	Определяется автором публикации материалов
SketchFab	3D-модели	Модели на основе сканирования поверхности, фотограмметрии и КТ	Постоянно пополняемая	Определяется автором публикации материалов

Данный обзор охватывает только базы, систематизирующие информацию о трехмерных моделях. Список ресурсов, содержащих полезную информацию о палеоантропологических материалах: тафономическую, палеопатологическую, метрическую и т.д. — есть на сайте NESPOS [<https://www.nespos.org/display/DBL/database+list> (дата обращения 10.09.20)]. Кроме того, в обзор не вошли базы, содержащие анонимизированные результаты томографических исследований живых людей: это поле очень обширно и список таких баз обновляется значительно чаще, в связи с чем они должны стать предметом отдельного изучения.

Цифровые копии для антропологических исследований: виртуальные модели и базы данных

Цифровая палеоантропологическая коллекция НИИ и Музея антропологии МГУ

Коллекция состоит из DICOM-данных и сканов поверхности около 300 палеоантропологических объектов. В данный момент коллекция готовится к веб-публикации, но хорошо известна из докладов на конференциях и публикаций [Evtsev, Grosheva, 2019]. Каталог коллекции постоянно пополняется и доступен по запросу.

Цифровая палеоантропологическая коллекция ИЭА РАН

Основная часть коллекции — 3D-модели палеоантропологической серии Черновая VIII, представленной как КТ-данными, так и сканами поверхности, сделанными различными способами (фотограмметрия структурированного цвета, комбинированное сканирование ручным сканером). Кроме указанной серии, коллекция содержит данные по другим палеоантропологическим объектам и суммарно составляет около 100 ед. В настоящий момент коллекция каталогизируется и готовится к размещению на сайтах ИЭА РАН.

digital @rchive: Цифровой архив ископаемых гоминид (Digital archive of Fossil Hominoids)

Архив Лаборатории виртуальной антропологии Венского университета, предлагающий платный доступ (55–100 евро) к 13 останкам ископаемых индивидов, большая часть которых представлена черепами или их частями. Данные состоят из КТ-сканов высокого разрешения, информации о каждом индивиде и изображений. Средства, полученные от продажи доступа к данным, направляются на поддержку организаций, связанных с сохранением культурного наследия в странах происхождения материалов. Долгое время digital @rchive был одним из самых крупных подобных хранилищ [Weber, 2015, p. 36].

NESPOS: Онлайн-система для профессиональных исследований неандертальцев (Neanderthal Studies Professional Online System)

NESPOS — централизованная база данных Неандертальского Музея, расположенного в долине Неандерталь в Германии. Платформа содержит цифровые данные по археологии плейстоцена, которые включают в себя трехмерные объекты, фотографии, текстовые документы, наборы данных и публикации. Палеоантропологические материалы составляют особую часть коллекции трехмерных объектов и представлены в разделе “Human Fossils”. Среди них останки не только неандертальцев, но также *Australopithecus*, *Homo erectus*, *Homo heidelbergensis* и анатомически современного человека. Доступ к данным предоставляется через оплачиваемое членство (может быть индивидуальным или организованным через институт). Благодаря сотрудничеству с Институтом приматологических исследований Университета Киото платформа также содержит информацию о некоторых видах приматов и соответствующие 3D-модели.

EVAN Archive: Архив Европейской сети виртуальной антропологии

База данных, тесно связанная с предыдущей, так как сам архив EVAN размещен на платформе NESPOS и разделен на две части: доступную только членам Общества EVAN и доступную членам общества EVAN и членам NESPOS. Сам архив включает 3D-модели приматов и некоторых других млекопитающих. Членство в обществе EVAN также предоставляет доступ к пакету программного обеспечения для геометрического анализа морфологии биологических объектов.

PRIMO: Приматологическая база для морфометрических исследований (Primate Morphometric database)

База данных для исследователей морфологии и эволюции приматов. Для получения полного доступа к базе необходимо запросить логин и пароль у кураторов базы по адресу, указанному на сайте. Информация о численности доступна только по состоянию на 2009 г. (однако известно, что база продолжала пополняться в последующие годы): это примерно 6580 индивидов, относящихся к 46 таксонам. Существенное отличие от других рассматриваемых в этой статье баз заключается в том, что данные представлены не в виде трехмерных объектов (т.е. «первоначальных данных»), а в виде снятых с оригиналов измерений и координат точек, полученных при помощи контактного сканера Miscroscribe («сырых данных») [Delson et al., 2007]).

3D-коллекция Национального музея естественной истории (Smithsonian National Museum of Natural History 3D Collection)

Виртуальная коллекция окаменелостей, артефактов, приматов и других животных, доступная на веб-сайте музея. Все объекты, включая ископаемых гоминид, доступны для просмотра, однако для скачивания и последующего некоммерческого использования доступны лишь приматы и другие животные, поскольку остальные категории курируются другими организациями и музей не имеет права их распространять. Доступные виртуальные объекты представлены моделями на основе сканирования поверхности и КТ.

ORSA: Открытый исследовательский архив сканов (Open Research Scan Archive)

Архив, созданный факультетом антропологии Пенсильванского университета, содержит более 1800 КТ-моделей черепов современных людей (в основном без нижней челюсти) в высоком разрешении (<1 мм). Основой базы является коллекция, собранная Самюэлем Мортонем в первой половине XIX в., впоследствии дополненная его учеником Джеймсом Эйткеном Мейгсом. Кроме того, архив пополняется за счет сканов материалов, хранящихся как в Музее археологии и антропологии Пенсильванского университета, так и в других музеях. Желаящим изучить виртуальную коллекцию музей готов предоставить как компьютерную лабораторию для работы в стенах музея, так и доступ по запросу для удаленной работы с коллекцией [Renschler, Monge, 2008].

Дом Мендруго (Casa del Mendrugo)

Небольшая (10 индивидов) коллекция моделей на основе сканирования поверхности черепов со следами искусственной деформации, покрытых резными узорами. Черепа являются частью археологической коллекции, происходящей из региона Пуэбла-Оахака в Мексике. Сканы и подробная информация об изображенных на них мотивах доступны для просмотра на сайте sketchfab.com [https://sketchfab.com/3d-models/cccm5-by-angelica-diosdado-oswaldo-camarillo-6b9638d1a50a4081b27cfc1ff5cea23b (дата обращения: 10.09.20)], однако недоступны для скачивания. По вопросам использования моделей, если оно возможно, нужно обращаться к руководству музея по указанному на официальном сайте адресу.

Исследовательский институт АО: AO Research Institute

АО — организация, специализирующаяся на хирургической травматологии, инициировавшая проект по созданию базы данных КТ-моделей костей человека. В 2007 г. коллекция продолжала пополняться и составляла 367 отсканированных костей. По запросу они могут быть предоставлены другим медицинским или исследовательским организациям. Более подробная информация о коллекции и процедуре сканирования содержится в статье “A CT Database for Research, Development and Education: Concept and Potential” [Messmer et al., 2007].

Краниотека факультета доистории и археологии Университета Гранады (La craneoteca del Departamento de Prehistoria y Arqueología de la UGR)

База виртуальных копий реплик антропологических материалов, составляющих остеологическую коллекцию факультета. 23 виртуальные копии (модели на основе сканирования поверхности) ископаемых гоминид от *Kenyanthropus platyops* до *Cro Magnon 1* доступны для просмотра на странице факультета. Возможность скачивания и дальнейшего использования материалов на сайте не обозначена.

Факультет естественных наук и математики Северной Каролины (North Carolina School of Science and Mathematics)

Данная база была создана с образовательной целью в рамках T.I.G.E.R. (the Teachers' Instructional Graphics Educational Resource) — хранилища визуального материала для преподавания анатомии. База содержит модели на основе сканирования поверхности 25 черепов современных людей, тазовых костей, около 30 черепов и некоторых других частей тела ископаемых гоминид и 5 черепов человекообразных обезьян. Все модели доступны только для просмотра. Авторские права принадлежат NCSSM [https://www.dlt.ncssm.edu/tiger/ (дата обращения: 11.09.20)]. База может быть полезна в ознакомительных и образовательных целях.

Оцифрованные болезни (Digitized Diseases)

Digitized Diseases — открытая база, содержащая модели на основе сканирования поверхности и КТ и рентген-снимки человеческих костей со следами патологий из археологических и медицинских коллекций. Ресурс предоставляет доступ к более чем 1600 примерам патологических изменений костей вследствие травм и болезней различного происхождения. Большинство образцов, происходящих из медицинских коллекций, содержат также информацию о поле/возрасте пациента и подробный диагноз. Модели и снимки доступны для просмотра и скачивания. Трехмерная печать или коммерческое использование представленных моделей запрещено.

Дитсонг — КТ-архив (DITSONG — CT Archive)

Совместный проект Института эволюционной антропологии общества Макса Планка и Трансваальского музея (The Ditsong National Museum of Natural History), на данный момент состоящий из одного архива. Архив содержит КТ-данные ископаемых человеческих останков с памятника Кромдраай в Южной Африке. Для каждого элемента доступны двумерные снимки модели, скан поверхности, видеоролик обзора мКТ и сами мКТ-данные. Всего отсканировано около 30 человеческих костей, относящихся к 9 индивидам, и 7 костей животных. Доступ к данным осуществляет-

Цифровые копии для антропологических исследований: виртуальные модели и базы данных

ся по запросу. Подробная информация о протоколе сканирования содержится в статье, на которую необходимо ссылаться при использовании данных архива [Skinner et al., 2013].

Факультет антропологии Колледжа Уэллсли (Wellesley College Anthropology Department)

Коллекция сканов поверхностей останков ископаемых гоминид, созданная в образовательных целях для слушателей курса антропологии. Хранится как на специально созданной странице на сайте колледжа, так и на платформе sketchfab [<https://sketchfab.com/WellesleyCollege/collections/anthropology-department-fossil-models>] (дата обращения: 11.09.2020)]. На момент написания статьи доступны 282 модели с кратким описанием объекта (происхождение, датировка, видовая принадлежность, пол, возраст). Все модели доступны только для просмотра.

Африканские находки (African Fossils)

Цель African Fossils — распространение знаний о происхождении человека при помощи современных технологий. На сайте проекта опубликованы трехмерные модели археологических находок, полученные при помощи фотограмметрии, лазерного и оптического сканирования. Находки представлены орудиями труда, останками животных и гоминид, оригиналы и (в некоторых случаях) слепки хранятся в Национальном музее Кении и Институте Бассейна Туркана. Все модели можно просмотреть, скачать и использовать для 3D-печати в некоммерческих целях без ограничений [Leakey, Dzambazova, 2013].

Проект «Видимый человек» (The Visible Human Project)

Проект Национальной медицинской библиотеки США, представивший в 1994–1995 гг. детальные трехмерные изображения мужского и женского тел, полученные при помощи МРТ- и КТ-сканирования трупов, а также фотографирования криосекций. Доступны изображения 1871 секции мужского трупа и 5189 — женского [Askerman, 1995]. С 2019 г. лицензия на использование материалов проекта не требуется, архивы можно скачать целиком со страницы проекта, там же доступна подробная информация о протоколах получения данных.

MorphoSource

Цифровое хранилище 3D-данных, преимущественно биологических объектов, в рамках которого партнеры могут размещать свои материалы, самостоятельно устанавливая режим доступа к ним (открытый или по запросу). Пользователи сайта могут искать и скачивать интересные их данные и подробную информацию о них: описание объекта, информацию о сканировании и условия использования данных. Опубликованные на платформе проекты используют все типы трехмерных объектов, а также двумерные изображения [Boyer et al., 2016].

Большая часть проектов на MorphoSource — зоологические, непосредственно антропологии в настоящий момент посвящены только 10 проектов. Для облегчения работы с платформой далее приведена краткая информация о них. В подборку вошли только те проекты, которые включают опубликованные данные.

1. «Прямоходящие» граждане: изучение эволюционных отношений между морфологией человека и прямохождением (“Upstanding” citizens: Examining the evolutionary relationships between human morphology and bipedalism). 28 фрагментов человеческих костей, сканы поверхностей. Коллекция является иллюстративным материалом для лекции по антропологии. Скачивание ограничено.

2. Сходство суставной поверхности крючковидной кости и средних фаланг кисти (Articular Surface Similarity of the Hamate and Manual Intermediate Phalanges). Сканы поверхностей средних фаланг 2–5 пальцев и соответствующих крючковидных костей индивидов из коллекций Терри в Национальном музее естественной истории США и коллекции Рэймонда Дарта в Университете Витватерсранда. 124 файла, относящихся к 25 индивидам. Скачивание ограничено.

3. Австралопитек седиба (*Australopithecus sediba*). 140 сканов поверхностей фрагментов костей из пещеры Малапа в Южной Африке, доступных для свободного скачивания.

4. Homo Naledi Neo. Реконструированный череп и фрагмент нижней челюсти самого полного индивида из камеры Леседи в пещерной системе Райзинг Стар. Сканы поверхностей, доступные для свободного скачивания.

5. K12 Human Evolution. Сканы поверхностей элементов коллекции, используемой для преподавания курса эволюции человека в Университете Дьюка. Архив состоит из 53 трехмерных моделей костей современного человека, ископаемых гоминид и приматов. Скачивание ограничено.

6. Травмы Гражданской войны 1861–1865 гг. (Национальный музей здравоохранения и медицины США (NMNH Civil War Trauma). 28 моделей; представлены как сканы поверхностей, так и КТ- и микроКТ-сканы. Скачивание ограничено.

7. Палеопатология, Национальный музей здравоохранения и медицины США (NMNH Paleopathology). Палеопатологическая коллекция музея представлена сканами поверхностей, КТ- и микроКТ-сканами. 22 модели. Скачивание ограничено.

8. Rising Star. Сканы поверхностей основных остеологических находок *Homo naledi* из системы пещер Райзинг Стар. Архив представлен 178 файлами, доступными для неограниченного скачивания.

9. База данных 3D-моделей находок из Арене Кандиде (The Arene Candide 3D Database). Сканы поверхностей остеологических находок верхнепалеолитического времени из пещер Арене Кандиде в Италии. 177 моделей. Скачивание ограничено.

10. Изменчивость размеров и формы таза восточноевропейских мужчин (Variation in Pelvic Shape and Size in Eastern European Males: A Computed Tomography Comparative Study). Проект представлен КТ-сканами тазовых костей 22 средневековых и 31 современного индивидов мужского пола. Скачивание моделей ограничено.

Sketchfab

Платформа, на которой любой зарегистрированный пользователь может публиковать свои трехмерные модели. В отличие от MorphoSource, Sketchfab не имеет ограничений по тематике: здесь размещаются художественные, игровые, дизайнерские и научные модели, как отсканированные и полученные при помощи фотограмметрии, так и созданные на компьютере. В настоящий момент на сайте опубликовано более 3 млн виртуальных объектов — это самая крупная платформа для организации публичного доступа к 3D-моделям. Сайт обладает удобным поисковым механизмом, что позволяет пользователям легко находить интересующие их модели и коллекции при помощи ключевых слов и добавлять их в персональные подборки после бесплатной регистрации.

Заключение

Настоящая статья дает краткую информацию о технических характеристиках виртуальных копий объектов антропологического изучения и суммирует информацию о доступных в Интернете архивах, содержащих виртуальные копии антропологических материалов в разных форматах, чтобы облегчить работу антропологам, планирующим использовать 3D-данные для своих исследований. Виртуальная антропология открывает ученым новые возможности, связанные с применением новых методов, доступом к уникальным экземплярам, или позволяет просто сократить время и стоимость исследований. Несомненна польза трехмерных антропологических моделей и для преподавания биологических дисциплин.

Большое разнообразие способов получения виртуальных копий объектов обеспечивает доступность качественных моделей для различных антропологических исследований. В данной статье были описаны разные способы создания моделей и суммированы основные подходы к их оценке с точки зрения качественных и количественных характеристик.

Обзор баз цифровых данных для антропологических исследований, представленный в настоящей статье, не является исчерпывающим: статус и содержание коллекций меняются со временем, информация о них актуальна на момент написания данной статьи. В дальнейшем, вероятно, количество открытых коллекций будет расти, что обеспечит в будущем более репрезентативные исследования, основанные на виртуальных трехмерных копиях.

Многие вопросы относительно использования виртуальных моделей в антропологических исследованиях, в частности вопросы этики и авторского права, остаются дискуссионными. Разумеется, роль традиционных методов работы с оригиналами не снижается, а исследования виртуальных копий обогащают арсенал доступных научно-исследовательских методов и в ряде случаев упрощают организационную сторону работы.

Финансирование. Публикуется в соответствии с планом научно-исследовательских работ Института этнологии и антропологии РАН. Исследование выполнено при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в соответствии с проектом № 17-29-04509.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Васильев А.Ю., Бужилова А.П., Егорова Е.А., Макарова Д.В., Березина Н.Я., Зорина И.С., Хартанович В.И. Конусно-лучевая компьютерная томография в палеоантропологии // Вестник рентгенологии и радиологии. 2016. № 5. С. 49–53.

Новиков М.М., Князь В.А., Галеев Р.М. Реверсивный инжиниринг палеоантропологических объектов для визуализации и исследований // Труды Междунар. конф. по компьютерной графике и зрению «Графикон». М.: Ин-т прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, 2018. № 28. С. 454–457.

Цифровые копии для антропологических исследований: виртуальные модели и базы данных

- Ackerman M.J.* The visible human project // *Proceedings of the IEEE*. 1998. Vol. 86 (3). P. 504–511.
- Barbeito-Andrés J., Anzelmo M., Ventrice F., Sardi M.L.* Measurement error of 3D cranial landmarks of an ontogenetic sample using computed tomography // *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*. 2012. Vol. 2 (2). P. 77–82. DOI: 10.1016/j.jobcr.2012.05.005.
- Bastir M.* Speedy Palaeoanthropology: How virtual morphology, digital databases and open access policies boost research in human evolution // *Biodiversity Information Science and Standards*. 2019. Vol. 3. P. e38778. DOI: 10.3897/biss.3.38778.
- Baumgaertel S., Palomo J.M., Palomo L., Hans M.G.* Reliability and accuracy of cone-beam computed tomography dental measurements // *Amer. Journal of Orthodontics and Dentofacial orthopedics*. 2009. Vol. 136 (1). P. 19–25. DOI: 10.1016/j.ajodo.2007.09.016.
- Berco M., Rigali Jr P.H., Miner R.M., DeLuca S., Anderson N.K., Will L.A.* Accuracy and reliability of linear cephalometric measurements from cone-beam computed tomography scans of a dry human skull // *Amer. Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2009. Vol. 136 (1). P. 17–18. DOI: 10.1016/j.ajodo.2008.08.021.
- Berger L.R., Hawks J., de Ruiter D.J., Churchill S.E., Schmid P., Deleuzene L.K., Kivell T.L., Garvin H.M., Williams S.A., DeSilva J.M., Skinner M.M., Musiba C.M., Cameron N., Holliday T.W., Harcourt-Smith W., Ackermann R.R., Bastir M., Bogin B., Bolter D., Brophy J., Cofran Z.D., Congdon K.A., Deane A.S., Dembo M., Drapeau M., Elliott M.C., Feuerriegel E.M., Garcia-Martinez D., Green D.J., Gurtov A., Irish J.D., Kruger A., Laird M.F., Marchi D., Meyer M.R., Nalla S., Negash E.W., Orr C.M., Radovcic D., Schroeder L., Scott J.E., Throckmorton Z., Tocheri M.W., VanSickle C., Walker C.S., Wei P., Zipfel B.* *Homo naledi*, a new species of the genus *Homo* from the Dinaledi Chamber, South Africa // *eLife*. 2015. P. 1–35. DOI: 10.7554/eLife.09560.
- Bookstein F.L.* Morphometric tools for landmark data. *Morphometric Tools for Landmark Data*. N. Y.: Cambridge University Press, 1991, 435 p.
- Boyer D.M., Gunnell G.F., Kaufman S., McGeary T.M.* Morphosource: Archiving and sharing 3-d digital specimen data // *The Paleontological Society Papers*. 2016. Vol. 22. P. 157–181. DOI: 10.1017/scs.2017.13.
- Buonamici F., Furferi R., Genitori L., Governi L., Marzola A., Mussa F., Volpe Y.* Reverse engineering techniques for virtual reconstruction of defective skulls: An overview of existing approaches // *Proceedings of CAD'18*. P., 2018. P. 6–10. DOI: 10.14733/cadaps.2019.103-112.
- Callieri M., Dellepiane M., Cignoni P., Scopigno, R.* Processing sampled 3D data: Reconstruction and visualization technologies // *Digital Imaging for Cultural Heritage Preservation: Analysis, Restoration, and Reconstruction of Ancient Artworks* / Eds. Stanco F., Battiato S., Gallo G. Boca Raton: Taylor and Francis, 2011. P. 103–132.
- Conroy G.C., Vannier, M. W.* Noninvasive three-dimensional computer imaging of matrix-filled fossil skulls by high-resolution computed tomography // *Science*. 1984. Vol. 226 (4673). P. 456–458. DOI: 10.1126/science.226.4673.456.
- Delson E., Harcourt Smith W.E., Frost, S.R., Norris, C.A.* Databases, data access, and data sharing in paleoanthropology: First steps // *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*. 2007. Vol. 16 (5). P. 161–163. DOI: 10.1002/evan.20141.
- Evtsev A., Grosheva A.* Nasal cavity and maxillary sinuses form variation among modern humans of Asian descent // *Amer. Journal of Phys. Anthropology*. 2019. Vol. 169 (3). P. 513–525. DOI: 10.1002/ajpa.23841.
- Friess M.* Scratching the surface? The use of surface scanning in physical and paleoanthropology // *Journal of Anthropol. Sciences*. 2012. Vol. 90. P. 1–25. DOI: 10.4436/jass.90004.
- Grieshaber B.M., Osborne D.L., Doubleday A.F., Kaestle F.A.* A pilot study into the effects of X-ray and computed tomography exposure on the amplification of DNA from bone // *Journal of Archaeol. Science*. 2008. Vol. 35 (3). P. 681–687. DOI: 10.1016/j.jas.2007.06.001.
- Fahrni S., Campana L., Dominguez A., Uldin T., Dedouit F. et al.* CT-scan vs. 3D surface scanning of a skull: First considerations regarding reproducibility issues // *Forensic sciences research*. 2017. Vol. 2 (2). P. 93–99. DOI: 10.1080/20961790.2017.1334353.
- Hall A., Sherlock E., Sykes D.* Does Micro-CT scanning damage DNA in museum specimens? // *Journal of Natural Science Collections*. 2015. Vol. 2. P. 22–29.
- Hassett B.R.* Which Bone to Pick: Creation, Curation, and Dissemination of Online 3D Digital Bioarchaeological Data // *Archaeologies*. 2018. Vol. 14 (2). P. 231–249. DOI: 10.1007/s11759-018-9344-z.
- Immel A., Le Cabec A., Bonazzi M., Herbig A., Temming H., Schuenemann V., Bos K.I., Langbein F., Harvati K., Bridault A., Pion G., Julien M.-A., Krotova O., Conard N.J., Münzel S.C., Drucker D.G., Viola B., Hublin J.-J., Tafforeau P., Krause J.* Effect of X-ray irradiation on ancient DNA in sub-fossil bones — Guidelines for safe X-ray imaging // *Scientific reports*. 2016. Vol. 6, 32969. P. 1–14. DOI: 10.1038/srep32969.
- Kamburoğlu K., Kolsuz E., Kurt H., Kılıç C., Özen T., Paksoy C.S.* Accuracy of CBCT measurements of a human skull // *Journal of digital imaging*. 2011. Vol. 24 (5). P. 787–793. DOI: 10.1007/s10278-010-9339-9.
- Katz D., Friess M.* 3D from standard digital photography of human crania — a preliminary assessment // *Amer. Journal of Phys. Anthropology*. 2014. Vol. 154 (1). P. 152–158. DOI: 10.1002/ajpa.22468.
- Knyaz V.A.* Image-based 3D reconstruction and analysis for orthodontia // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2012. Vol. XXXIX-B3. P. 585–589. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B3-585-2012>.

- Knyaz V.A., Leybova N.A., Galeev R., Novikov M., Gaboutchian A.V.* Photogrammetric techniques for paleoanthropological objects preserving and studying // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2018. Vol. XLII-2. P. 525–530. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-525-2018.
- Kuhn J.L., Goldstein S.A., Feldkamp L.A., Goulet R.W., Jesion G.* Evaluation of a microcomputed tomography system to study trabecular bone structure // *Journal of Orthopaedic Research*. 1990. Vol. 8 (6). P. 833–842. DOI: 10.1002/jor.1100080608.
- Kullmer O.* Benefits and risks in virtual anthropology // *Journal of Anthropol. Sciences*. 2008. Vol. 86. P. 205–207.
- Kulczyk T., Rychlik M., Lorkiewicz-Muszyńska D., Abreu-Głowacka M., Czajka-Jakubowska A., Przysańska A.* Computed tomography versus optical scanning: a comparison of different methods of 3D data acquisition for tooth replication // *BioMed Research International*. 2019. Vol. 2019. P. 1–7. DOI: 10.1155/2019/4985121.
- Leakey L., Dzambazova T., Canessa E., Fonda C., Zennaro M.* Prehistoric collections and 3D printing for education // *Low-Cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development* [Internet]. ICTP — The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. 2013. P. 159–62.
- Lorkiewicz-Muszyńska D., Kociemba W., Sroka A., Kulczyk T., Żaba C., Paprzycki W., Przysańska A.* Accuracy of the anthropometric measurements of skeletonized skulls with corresponding measurements of their 3D reconstructions obtained by CT scanning // *Anthropologischer Anzeiger*. 2015. Vol. 72 (3). P. 293–301. DOI: 10.1127/anthranz/2015/0481.
- Mathys A., Brecko J., Semal P.* Comparing 3D digitizing technologies: what are the differences? // *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*. 2013. Vol. 1. P. 201–204.
- Messmer P., Matthews F., Jacob A.L., Kikinis R., Regazzoni P., Noser H.* A CT database for research, development and education: concept and potential // *Journal of digital imaging*. 2007. Vol. 20 (1). P. 17–22. DOI: 10.1007/s10278-006-0771-9.
- Park H.K., Chung J.W., Kho H.S.* Use of hand-held laser scanning in the assessment of craniometry // *Forensic Science International*. 2006. Vol. 160 (2-3). P. 200–206. DOI: 10.1016/j.forsciint.2005.10.007.
- Profico A., Bellucci L., Buzi C., Di Vincenzo F., Micarelli I., Strani F., Tafuri M.A., Manzi G.* Virtual anthropology and its application in cultural heritage studies // *Studies in Conservation*. 2019. Vol. 64 (6). P. 323–336. DOI: 10.1080/00393630.2018.1507705.
- Renschler E.S., Monge J.* The Samuel George Morton cranial collection: Historical significance and new research // *Expedition*. 2008. Vol. 50 (3). P. 30–38.
- Richard A.H., Parks C.L., Monson K.L.* Accuracy of standard craniometric measurements using multiple data formats // *Forensic Science International*. 2014. Vol. 242. P. 177–185. DOI: 10.1016/j.forsciint.2014.06.015.
- Richtsmeyer J.T., Paik C.H., Elfert P.C., Cole T.M., Dahlman H.R.* Precision, repeatability, and validation of the localization of cranial landmarks using computed tomography scans // *The Cleft palate-craniofacial journal*. 1995. Vol. 32 (3). P. 217–227. DOI: 10.1597/1545-1569_1995_032_0217_pravot_2.3.co_2.
- Rühli F.J., Kuhn G., Evison R., Müller R., Schultz M.* Diagnostic value of micro-CT in comparison with histology in the qualitative assessment of historical human skull bone pathologies // *Amer. Journal of Phys. Anthropology*. 2007. Vol. 133 (4). P. 1099–1111. DOI: 10.1002/ajpa.20611.
- Sholts S.B., Wärmländer S.K., Flores L.M., Miller K.W., Walker P.L.* Variation in the measurement of cranial volume and surface area using 3D laser scanning technology // *Journal of forensic sciences*. 2010. Vol. 55 (4). P. 871–876. DOI: 10.1111/j.1556-4029.2010.01380.x.
- Sholts S.B., Flores L., Walker P.L., Wärmländer, S.K.* 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*. 2011. Vol. 21 (5). P. 535–543. DOI: 10.1002/oa.1156.
- Skinner M.M., Kivell T.L., Potze S., Hublin J.J.* Microtomographic archive of fossil hominin specimens from Kromdraai B, South Africa // *Journal of human evolution*. 2013. Vol. 64 (5). P. 434–447. DOI: 10.1016/j.jhevol.2013.01.007.
- Slizewski A., Friess M., Semal P.* Surface scanning of anthropological specimens: Nominal-actual comparison with low cost laser scanner and high end fringe light projection surface scanning systems // *Quartär*. 2010. Vol. 57. P. 179–187.
- Weber G.W.* Virtual anthropology (VA): A call for glasnost in paleoanthropology // *The Anatomical Record: An Official Publication of the American Association of Anatomists*. 2001. Vol. 265 (4). P. 193–201. DOI: 10.1002/ar.1153.
- Weber G.W.* Virtual anthropology // *Amer. Journal of Phys. Anthropology*. 2015. Vol. 156. P. 22–42. DOI: 10.1002/ajpa.22658.
- White S., Hirst C., Smith S.E.* The Suitability of 3D Data: 3D Digitisation of Human Remains // *Archaeologies*. 2018. Vol. 14 (2). P. 250–271. DOI: 10.1007/s11759-018-9347-9.

Источники

- African Fossils. URL: <https://africanfossils.org/> (дата обращения: 11.09.20).
- AO Research Institute. URL: <https://www.aofoundation.org/> (дата обращения: 10.09.20).
- Casa del Mendrugio. URL: <https://www.casadelmendrugio.com/museo> (дата обращения: 10.09.20).
- digital @rchive. URL: <https://www.virtual-anthropology.com/3d-data/data-webshop/> (дата обращения: 28.08.20).
- Digitized Diseases. URL: <http://www.digitiseddiseases.org/alpha/> (дата обращения: 11.09.20).

Цифровые копии для антропологических исследований: виртуальные модели и базы данных

- DITSONG — CT Archive. URL: <http://paleo.eva.mpg.de/ditsong/> (дата обращения: 11.09.20).
- Human Genome Project. URL: <https://www.genome.gov/human-genome-project> (дата обращения: 10.12.20).
- La craneoteca del Departamento de Prehistoria y Arqueología de la UGR. URL: <http://prehistoria.uarqueologia.es/craneoteca/index.php/craneoteca> (дата обращения: 10.09.20).
- Moraes C. Comparing 7 photogrammetry systems. Which is the best one? // Arc-Team Open Research. 2016. URL: <https://arc-team-open-research.blogspot.com/2016/12/comparing-7-photogrammetry-systems.html> (дата обращения: 10.09.20).
- MorphoSource. URL: <https://www.morphosource.org/About/home> (дата обращения: 15.02.20).
- Neanderthal Studies Professional Online System (NESPOS). URL: <https://www.nespos.org/display/DocumentationSpace/Home> (дата обращения: 10.09.20).
- NESPOS Database list. URL: <https://www.nespos.org/display/DBL/database+list>. (дата обращения: 10.09.20).
- North Carolina School of Science and Mathematics. URL: https://www.dlt.ncssm.edu/tiger/360views/masterindex.htm?fbclid=IwAR3IM1e8jSKeOmgdSekbfHV5KpW54wvBYqIBUXxiKHtCFUXhO0Xv_jx9BNs (дата обращения: 10.09.20).
- Open Research Scan Archive (ORSA). URL: <https://www.penn.museum/sites/orsa/Welcome.html> (дата обращения: 10.09.20).
- Primate Anthropological Database (PRIMO). URL: <https://primo.nyserp.org/> (дата обращения: 10.09.20).
- Sketchfab. URL: <https://sketchfab.com/feed> (дата обращения: 16.02.20).
- Smithsonian National Museum of Natural History 3D Collection. URL: <http://humanorigins.si.edu/evidence/3d-collection> (дата обращения: 10.09.20).
- The European Virtual Anthropology Network (EVAN) Archive. URL: <https://www.evan-society.org/support/evan-archive/> (дата обращения: 10.09.20).
- The Visible Human Project. URL: https://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html (дата обращения: 29.08.20).
- Wellesley College Anthropology Department. URL: <http://academics.wellesley.edu/ris/anth207x/3Dscans.html> (дата обращения: 11.09.20).

Syutkina T.A., Galeev R.M.

N.N. Miklukho-Maklai Institute of Ethnology and Anthropology
Leninskiy prospect, 32a, Moscow, 119334, Russian Federation
E-mail: syuttaya@gmail.com (Syutkina T.A.); ravil.galeev@gmail.com (Galeev R.M.)

Digital Copies for Anthropological Research: Virtual Models and Databases

In the last two decades, a large number of anthropological papers have been focused on digital copies of palaeoanthropological materials rather than original skeletal remains. According to some foreign scholars, “virtual anthropology” has taken a shape of a separate field of anthropological science. One of the main advantages of “virtual anthropology” is the possibility to develop databases, datasets, digital collections and catalogues accessible to the scientific community worldwide. Digitization of research objects facilitates organizational side of studies, provides access to wider data, expands the toolkit of available research methods, and also provides safety to the original materials. At the same time, the variability of types of virtual models along with the absence of generally accepted protocols complicate verification of morphometric and structures data. The main goal of this review paper is to structure the available information on virtual palaeoanthropological databases and the materials they contain. 3D-scanning technologies can be generally divided into surface scanning (including photogrammetry) and tomographic scanning. The first group of technologies provide 3D models of the shape of an object, accurate enough to be used in morphometric studies if resolution of the equipment is adequate for the size of the object and aims of the study. The second group is designed to scan the whole form of an object, which allows the examination of its internal structures or tissues, small surface structures or dental material. Both methods have their strengths and weaknesses: while surface scans are cheaper and easier to obtain, CT scans provide information unavailable from the former technique. Assessment of qualitative and quantitative characteristics of digital copies depends on objectives of the study. The article provides an overview of 17 databases of virtual paleoanthropological models, which comprise either surface or CT scans, or both. These materials can be used in various fields of study, including human evolution, primatology, palaeoanthropology, palaeopathology, forensic science, human anatomy, as well as in teaching of these subjects. For each collection, approximate number of objects and terms of use have been specified.

Key words: virtual anthropology, surface scanning, computed tomography, microtomography, photogrammetry, digital databases.

Funding. Published in accordance with the research plan of the Institute of Ethnology and Anthropology RAS. The study was partially funded by Russian Foundation for Basic Research, grant 17-29-04509.

REFERENCES

- Ackerman M.J. (1998). The visible human project. *Proceedings of the IEEE*, 86(3), 504–511.

Barbeito-Andrés J., Anzelmo M., Ventrice F., Sardi M. L. (2012). Measurement error of 3D cranial landmarks of an ontogenetic sample using computed tomography. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 2(2), 77–82. DOI: 10.1016/j.jobcr.2012.05.005.

Bastir M. (2019). Speedy Palaeoanthropology: How virtual morphology, digital databases and open access policies boost research in human evolution. *Biodiversity Information Science and Standards*, 3, e38778. DOI: 10.3897/biss.3.38778.

Baumgaertel S., Palomo J.M., Palomo L., Hans M.G. (2009). Reliability and accuracy of cone-beam computed tomography dental measurements. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 136(1), 19–25. DOI: 10.1016/j.ajodo.2007.09.016.

Berco M., Rigali Jr P.H., Miner R.M., DeLuca S., Anderson N.K., & Will L.A. (2009). Accuracy and reliability of linear cephalometric measurements from cone-beam computed tomography scans of a dry human skull. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 136(1), 17–e1. DOI: 10.1016/j.ajodo.2008.08.021.

Berger L.R., Hawks J., de Ruiter D.J. et al. (2015). Homo naledi, a new species of the genus Homo from the Dinaledi Chamber, South Africa. *elife*, 4, e09560. DOI: 10.7554/eLife.09560.

Bookstein F.L. (1991). *Morphometric tools for landmark data*. New York.

Boyer D.M., Gunnell G.F., Kaufman S., McGeary T.M. (2016). Morphosource: Archiving and sharing 3-d digital specimen data. *The Paleontological Society Papers*, 22, 157–181. DOI: 10.1017/scs.2017.13.

Buonamici F., Furferi R., Genitori L., Governi L., Marzola A., Mussa F., Volpe Y. (2018). Reverse engineering techniques for virtual reconstruction of defective skulls: An overview of existing approaches. *Proceedings of CAD'18*, 6–10. DOI: 10.14733/cadaps.2019.103-112.

Callieri M., Dellepiane M., Cignoni P., Scopigno R. (2011). *Processing sampled 3D data: Reconstruction and visualization technologies*, 103–132. Boca Raton: Taylor and Francis.

Conroy G.C., Vannier M.W. (1984). Noninvasive three-dimensional computer imaging of matrix-filled fossil skulls by high-resolution computed tomography. *Science*, 226(4673), 456–458. DOI: 10.1126/science.226.4673.456.

Delson E., Harcourt Smith W.E., Frost S.R., Norris C.A. (2007). Databases, data access, and data sharing in paleoanthropology: First steps. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 16(5), 161–163. DOI: 10.1002/evan.20141.

Evteev A.A., Grosheva A.N. (2019). Nasal cavity and maxillary sinuses form variation among modern humans of Asian descent. *American journal of physical anthropology*, 169(3), 513–525. DOI: 10.1002/ajpa.23841.

Fahrni S., Campana L., Dominguez A., Uldin T., Dedouit F., Delémont O., Grabherr S. (2017). CT-scan vs. 3D surface scanning of a skull: First considerations regarding reproducibility issues. *Forensic sciences research*, 2(2), 93–99. DOI: 10.1080/20961790.2017.1334353.

Friess M. (2012). Scratching the surface? The use of surface scanning in physical and paleoanthropology. *Journal of Anthropological Sciences*, 90, 1–25. DOI: 10.4436/jass.90004.

Grieshaber B.M., Osborne D.L., Doubleday A.F., Kaestle F.A. (2008). A pilot study into the effects of X-ray and computed tomography exposure on the amplification of DNA from bone. *Journal of Archaeological Science*, 35(3), 681–687. DOI: 10.1016/j.jas.2007.06.001.

Hall A., Sherlock E., Sykes D. (2015). Does micro-CT scanning damage DNA in museum specimens?. *Journal of Natural Science Collections*, (2), 22–29.

Hassett B.R. (2018). Which Bone to Pick: Creation, Curation, and Dissemination of Online 3D Digital Bioarchaeological Data. *Archaeologies*, 14(2), 231–249. DOI: 10.1007/s11759-018-9344-z.

Immel A., Le Cabec A., Bonazzi M. et al. (2016). Effect of X-ray irradiation on ancient DNA in sub-fossil bones — Guidelines for safe X-ray imaging. *Scientific reports*, 6, 32969. DOI: 10.1038/srep32969.

Kamburoğlu K., Kolsuz E., Kurt H., Kılıç C., Özen T., Paksoy C.S. (2011). Accuracy of CBCT measurements of a human skull. *Journal of digital imaging*, 24(5), 787–793. DOI: 10.1007/s10278-010-9339-9.

Katz D., Friess M. (2014). 3D from standard digital photography of human crania — a preliminary assessment. *American Journal of Physical Anthropology*, 154(1), 152–158. DOI: 10.1002/ajpa.22468.

Knyaz V.A. (2012). Image-based 3D reconstruction and analysis for orthodontia. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39(B3), 585–589. DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B3-585-2012.

Knyaz V.A., Leybova N.A., Galeev R., Novikov M., Gaboutchian A.V. (2018). Photogrammetric Techniques For Paleoanthropological Objects Preserving And Studying. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 2. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-525-2018.

Kuhn J.L., Goldstein S.A., Feldkamp L.A., Goulet R.W., Jesion G. (1990). Evaluation of a microcomputed tomography system to study trabecular bone structure. *Journal of Orthopaedic Research*, 8(6), 833–842. DOI: 10.1002/jor.1100080608.

Kulczyk T., Rychlik M., Lorkiewicz-Muszyńska D., Abreu-Głowacka M., Czajka-Jakubowska A., Przysańska, A. (2019). Computed tomography versus optical scanning: a comparison of different methods of 3D data acquisition for tooth replication. *BioMed Research International*, 2019. DOI: 10.1155/2019/4985121.

Kullmer O. (2008). Benefits and risks in virtual anthropology. *J. Anthropol. Sci*, 86, 205–207.

Leakey L., Dzambazova T., Canessa E., Fonda C., Zennaro M. (2013). Prehistoric collections and 3D printing for education. *Low-Cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development [Internet]. ICTP — The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics*, 159–62.

Lorkiewicz-Muszyńska D., Kociemba W., Sroka A., Kulczyk T., Żaba C., Paprzycki W., Przysańska A. (2015). Accuracy of the anthropometric measurements of skeletonized skulls with corresponding measurements of their 3D reconstructions obtained by CT scanning. *Anthropologischer Anzeiger*, 72(3), 293–301. DOI: 10.1127/anthranz/2015/0481.

Mathys A., Brecko J., Semal P. (2013). Comparing 3D digitizing technologies: What are the differences? *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, 1, 201–204.

Messmer P., Matthews F., Jacob A.L., Kikinis R., Regazzoni P., Noser H. (2007). A CT database for research, development and education: Concept and potential. *Journal of digital imaging*, 20(1), 17–22. DOI: 10.1007/s10278-006-0771-9.

Novikov M.M., Kniaz' V.A., Galeev R.M. (2018). Reverse engineering of paleoanthropological objects for visualization and investigation. *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii po komp'iuternoj grafiki i zreniiu "Grafikon"*, (28), 454–457. (Rus.).

Park H.K., Chung J.W., Kho H.S. (2006). Use of hand-held laser scanning in the assessment of craniometry. *Forensic Science International*, 160(2-3), 200–206. DOI: 10.1016/j.forsciint.2005.10.007.

Profico A., Bellucci L., Buzi C. et al. (2019). Virtual anthropology and its application in cultural heritage studies. *Studies in Conservation*, 64(6), 323–336. DOI: 10.1080/00393630.2018.1507705.

Renschler E.S., Monge J. (2008). The Samuel George Morton cranial collection — historical significance and new research. *Expedition*, 50(3), 30–38.

Richard A.H., Parks C.L., Monson K.L. (2014). Accuracy of standard craniometric measurements using multiple data formats. *Forensic science international*, 242, 177–185. DOI: 10.1016/j.forsciint.2014.06.015.

Richtsmeier J.T., Paik C.H., Elfert P.C., Cole T.M., Dahlman H.R. (1995). Precision, repeatability, and validation of the localization of cranial landmarks using computed tomography scans. *The Cleft palate-craniofacial journal*, 32(3), 217–227. DOI: 10.1597/1545-1569_1995_032_0217_pravot_2.3.co_2.

Rühli F.J., Kuhn G., Evison R., Müller R., Schultz M. (2007). Diagnostic value of micro-CT in comparison with histology in the qualitative assessment of historical human skull bone pathologies. *American Journal of Physical Anthropology*, 133(4), 1099–1111. DOI: 10.1002/ajpa.20611.

Sholts S.B., Flores L., Walker P.L., Wärmländer S.K. (2011). 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(5), 535–543. DOI: 10.1002/oa.1156.

Sholts S.B., Wärmländer S.K., Flores L.M., Miller K.W., Walker P.L. (2010). Variation in the measurement of cranial volume and surface area using 3D laser scanning technology. *Journal of forensic sciences*, 55(4), 871–876. DOI: 10.1111/j.1556-4029.2010.01380.x.

Skinner M.M., Kivell T.L., Potze S., Hublin J.J. (2013). Microtomographic archive of fossil hominin specimens from Kromdraai B, South Africa. *Journal of human evolution*, 64(5), 434–447. DOI: 10.1016/j.jhevol.2013.01.007.

Slizewski A., Friess M., Semal P. (2010). Surface scanning of anthropological specimens: Nominal-actual comparison with low cost laser scanner and high end fringe light projection surface scanning systems. *Quartär*, 57, 179–187.

Vasil'ev A.Iu., Buzhilova A.P., Egorova E.A., Makarova D.V., Berezina N.Ia., Zorina I.S., Khartanovich V.I. (2016). Cone-beam computed tomography in paleoanthropology. *Vestnik rentgenologii i radiologii*, (5), 49–53. (Rus.). DOI: 10.20862/0042-4676-2014-0-5-49-53.

Weber G.W. (2001). Virtual anthropology (VA): A call for glasnost in paleoanthropology. *The Anatomical Record: An Official Publication of the American Association of Anatomists*, 265(4), 193–201. DOI: 10.1002/ar.1153.

Weber G.W. (2015). Virtual anthropology. *American journal of physical anthropology*, 156, 22–42. DOI: 10.1002/ajpa.22658.

White S., Hirst C., Smith S.E. (2018). The Suitability of 3D Data: 3D Digitisation of Human Remains. *Archaeologies*, 14(2), 250–271. DOI: 10.1007/s11759-018-9347-9.

Сюткина Т.А., <https://orcid.org/0000-0002-6222-4929>

Галеев Р.М., <https://orcid.org/0000-0002-5816-4820>



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Accepted: 07.12.2020

Article is published: 26.02.2021