

Д. Аманов, В. А. Купин, А. В. Митрофанова

МИРОВОЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СОХРАНЕНИИ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

Поступила в редакцию 19.04.2025 г.

Принята к публикации 26.06.2025 г.

doi: 10.5922/vestniknat-2025-3-2

22

Для цитирования: Аманов Д., Купин В. А., Митрофанова А. В. Мировой опыт применения трехмерного моделирования в сохранении культурного наследия // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные науки. 2025. №3. С. 22—38. doi: 10.5922/vestniknat-2025-3-2.

Современные цифровые технологии играют ключевую роль в сохранении культурного наследия, предоставляя новые возможности для его изучения и документирования. Одним из перспективных методов является трехмерное моделирование, позволяющее создавать точные цифровые копии исторических объектов. Цель настоящего исследования — проанализировать международные практики внедрения 3D-моделирования в области сохранения архитектурных и археологических памятников. Рассмотрены методы лазерного сканирования, фотограмметрии и гиперспектрального анализа, их преимущества и ограничения. Особое внимание уделено примерам успешных международных проектов, таких как CyArk и Flyover Zone, демонстрирующих эффективность 3D-моделирования в сохранении и популяризации культурных ценностей. Основные выводы исследования касаются перспектив развития цифровых методов сохранения наследия, их интеграции в мировую практику и необходимости дальнейшего междисциплинарного сотрудничества.

Ключевые слова: культурное наследие, цифровые технологии, трехмерное моделирование, виртуальная реконструкция, лазерное сканирование, фотограмметрия, гиперспектральный анализ

Введение

Культурное наследие — не просто актив человечества, а бесценное зеркало, отражающее богатейшую историю, традиции и достижения цивилизаций, прошедших сквозь века. В Едином государственном реестре объектов культурного наследия Российской Федерации зарегистрировано более 156 тысяч объектов, из которых около 56 тысяч — объекты археологического наследия [1]. Памятники архитектуры, загадочные археологические комплексы, вдохновляющие произведения искусства и живописные исторические ландшафты хранят уникальные сведения о прошлом, формируют наше самосознание и служат незримой связью между поколениями. Сохранение этого богатства для потомков — не только моральный долг, но и ключевая задача современного общества.



Тем не менее культурное наследие подвержено постоянным угрозам. Одной из ключевых проблем является неудовлетворительное состояние значительной части исторических объектов, которые потенциально могут быть использованы в туристических целях. По данным профильного комитета Совета Федерации, по всей стране выявлено более 3 тысяч физически утраченных объектов [2]. Из-за строгих правил охраны практически каждый восьмой объект, включенный в реестр культурного наследия, долгие годы не ремонтировался и не поддерживался и сегодня находится в неудовлетворительном состоянии [2]. В настоящее время состояние почти 14 тысяч памятников архитектуры и более 13 тысяч памятников археологии оценивается как неудовлетворительное [2]. Эти цифры говорят красноречивее любых слов, подчеркивая серьезность ситуации.

Природные катаклизмы, включая землетрясения, наводнения и ураганы, способны нанести значительный ущерб историческим объектам. Однако воздействие времени, загрязнение окружающей среды и антропогенный фактор, включая хозяйственную деятельность, также ведут к постепенной деградации и разрушению культурного наследия. По данным 69 субъектов Российской Федерации, в период действия определенных законодательных норм было выявлено 1375 фактов причинения вреда объектам археологического наследия в результате хозяйственной деятельности, что составляет 87 % от общего количества подобных случаев, тогда как лишь 13 % (210 фактов) связаны с незаконным поиском археологических предметов [2]. Указанные обстоятельства ограничивают потенциал ряда регионов и замедляют развитие туристической индустрии, особенно в секторе культурно-исторического туризма.

Расширение использования цифровых технологий в деле сохранения культурного наследия поднимает вопросы о правовом статусе и применении цифровых копий, а также о возможности замещения оригиналов. Права на 3D-модели обычно принадлежат создавшим их организациям (музеям, архивам, университетам, компаниям) как результат интеллектуального труда. Для обеспечения широкого доступа часто применяются лицензии для образовательных, научных и некоммерческих целей. Однако цифровая копия не является заменой подлинного объекта. Оригинал несет уникальную информацию о материалах, технологиях и историческом контексте, что делает его незаменимым для изучения и сохранения культурной памяти. Утрата физических объектов невосполнима даже при наличии самых точных цифровых реплик. Вопросы застройки территорий с объектами культурного наследия должны решаться с безусловным приоритетом сохранения оригинала. Цифровые копии служат средством фиксации информации об утраченных объектах, но не их эквивалентом. Сохранение подлинника в его физической форме остается первостепенной задачей.

В условиях возрастающих угроз технологии играют все более значимую роль в сохранении культурного наследия. Прежде всего цифровые технологии, такие как трехмерное моделирование, оказывают су-



щественное влияние на методы сохранения и изучения культурных ценностей. Трехмерное моделирование выступает эффективным инструментом, позволяющим создавать точные цифровые репрезентации объектов, обладающих историческим и культурным значением. Применение 3D-технологий обеспечивает детализацию и долговременное сохранение информации об архитектурных сооружениях, артефактах и памятниках, предоставляя новые возможности для их исследования, реставрации и виртуальной демонстрации.

Мировой опыт показывает тенденцию к расширяющейся интеграции трехмерного моделирования в практики сохранения культурных ценностей. Эта технология зарекомендовала себя как действенный и результативный инструмент. Используя методы лазерного сканирования, фотограмметрии и компьютерной обработки данных, специалисты создают высокоточные модели, которые позволяют не только зафиксировать текущее состояние объектов для будущих поколений, но и углубить наше понимание их архитектурных, исторических и культурных особенностей. Более того, 3D-модели используются для виртуальной реконструкции утраченных элементов, создания интерактивных образовательных ресурсов и обеспечения широкого доступа к культурному наследию через цифровые платформы.

В соответствии с этим целью настоящей статьи стал анализ мирового опыта применения трехмерного моделирования для сохранения культурного наследия. В рамках исследования проанализированы различные методы 3D-моделирования, используемые в этой области, рассмотрены релевантные примеры применения технологии в различных регионах мира, проведена оценка преимуществ и вызовов, связанных с ее использованием, и инициирована дискуссия о перспективах дальнейшего развития и интеграции трехмерного моделирования в практику сохранения мирового культурного наследия.

Сохранение культурного наследия в цифровую эпоху все чаще опирается на возможности трехмерного моделирования, которое предоставляет бесценные инструменты для документации, анализа и виртуализации объектов культурного значения. В арсенале специалистов есть несколько ключевых технологий, каждая из которых обладает своими уникальными преимуществами и подходит для различных задач. Одной из наиболее точных и детализированных технологий является лазерное сканирование. В его основе лежит принцип измерения расстояний с помощью лазерного луча. Сканер, испуская луч, фиксирует время его прохождения до поверхности объекта и обратно, определяя тем самым координаты множества точек. Совокупность этих точек формирует облако, которое, будучи обработанным, превращается в высокоточную трехмерную модель [11]. Лазерное сканирование незаменимо, когда требуется мельчайшая детализация архитектурных элементов, сложных скульптурных форм или фиксация деформаций и повреждений с миллиметровой точностью. Оно позволяет детально документировать фасады зданий, интерьеры, археологические раскопы, обеспечивая беспрецедентную точность геометрических измерений.



В противовес лазерному сканированию, которое требует специализированного и зачастую дорогостоящего оборудования, фотограмметрия представляет собой более доступный и универсальный метод. Он предполагает построение трехмерной модели на основе серии перекрывающихся фотографий объекта, сделанных с различных ракурсов. Специализированное программное обеспечение анализирует эти фотографии, выявляет общие точки и на основе триангуляции вычисляет трехмерные координаты, создавая цифровую модель. Фотограмметрия особенно эффективна при работе с крупными объектами и территориями, такими как археологические памятники, исторические городские ландшафты или руины. Благодаря своей мобильности и относительной простоте фотограмметрия получила широкое распространение для документирования масштабных объектов культурного наследия, создания виртуальных туров и популяризации исторического знания. Важным преимуществом фотограмметрии является возможность одновременного получения текстурной информации, так как фотографии, используемые для создания геометрии, служат и для текстурирования 3D-модели, делая ее визуально реалистичной [12]. Сравнительная характеристика лазерного сканирования и фотограмметрии как методов документирования культурного наследия представлена в таблице.

**Сравнительная характеристика лазерного сканирования и фотограмметрии
для документирования культурного наследия**

Критерий сравнения	Лазерное сканирование (TLS)	Фотограмметрия
Принцип работы	Активное измерение расстояний лазерным лучом	Пассивное построение модели по перекрывающимся фотографиям
Точность (геометрическая)	Высокая (мм), до 2–5 мм для Faro/Leica	Варьируется, может достигать высокой (2–3 мм) при оптимальных условиях и оборудовании
Детализация поверхности	Отличная для геометрии, фиксация мельчайших деформаций	Отличная для текстуры, хорошая для геометрии при плотном облаке точек
Скорость сбора данных	Высокая, особенно для крупных объектов	Варьируется, сбор фотографий быстрый, обработка данных может быть длительной
Зависимость от освещения	Низкая (использует собственный источник света)	Высокая (требует равномерного достаточного освещения)
Работа с отражающими / прозрачными поверхностями	Затруднена, возможны пробелы в данных	Затруднена, сложность в поиске общих точек
Работа с однородными / бесфактурными поверхностями	Эффективна (фокусируется на геометрии)	Затруднена, сложность в поиске общих точек



Окончание табл.

Критерий сравнения	Лазерное сканирование (TLS)	Фотограмметрия
Стоимость оборудования	Высокая (десятки тысяч долларов)	Относительно низкая (цифровые камеры, дроны)
Сложность обработки данных	Высокая, требует специализированного ПО и навыков	Высокая, требует специализированного ПО и навыков
Объем данных	Очень большой (миллионы точек)	Очень большой (высокоразрешенные фото, облака точек)
Примеры применения	Крупные архитектурные сооружения, сложные скульптуры	Крупные археологические памятники, городские ландшафты, объекты с богатой текстурой, виртуальные туры
Нецелесообразность применения	Объекты с обширной растительностью, скрытые элементы, чувствительные к лазеру поверхности (редко)	Объекты в плохих условиях освещения, очень однородные, сильно отражающие / прозрачные поверхности, недостаток перекрытия

В дополнение к методам, ориентированным на внешнюю геометрию объектов, существуют технологии, позволяющие заглянуть внутрь, не нарушая целостности артефактов. К таким методам относятся компьютерная томография (КТ) и рентгенография. Рентгенография, создавая плоское изображение на основе различной проницаемости материалов для рентгеновского излучения, позволяет выявлять скрытые неоднородности и детали внутренней структуры. Однако по-настоящему революционным методом неразрушающего исследования стала компьютерная томография. КТ, получая серию рентгеновских снимков под разными углами и обрабатывая их с помощью сложных алгоритмов, позволяет реконструировать трехмерное изображение внутренней структуры объекта. Это открывает уникальные возможности для изучения запечатанных артефактов, мумий, старинных книг и произведений искусства, позволяя выявлять скрытые повреждения, внутренние полости, структуру материалов и даже технику исполнения, не прибегая к инвазивным методам. Рентгенография и компьютерная томография стали незаменимыми инструментами для исследования хрупких и ценных артефактов, предоставляя бесценную информацию для реставраторов, историков и искусствоведов.

Помимо методов, фокусирующихся на геометрии объектов, в арсенале специалистов по сохранению культурного наследия есть ряд технологий, позволяющих получить ценную информацию о материалах, скрытых деталях и подводных объектах. Одной из таких технологий является инфракрасная фотография. В отличие от обычной фотографии, фиксирующей видимый свет, инфракрасная фотография реги-



стрирует излучение в инфракрасном диапазоне спектра. Различные материалы по-разному отражают и поглощают инфракрасное излучение, что позволяет выявлять различия, невидимые человеческому глазу. В контексте культурного наследия инфракрасная фотография становится незаменимым инструментом для раскрытия скрытых деталей произведений искусства и исторических объектов. Например, она позволяет увидеть подслои краски на картинах, обнаруживая первоначальный рисунок автора, изменения, внесенные в процессе работы, или даже более ранние изображения, скрытые под верхними слоями краски. Также инфракрасная фотография может выявить скрытые надписи, записи или орнаменты на исторических документах, стенах зданий или других объектах, ставшие невидимыми из-за времени, загрязнений или намеренного сокрытия. Преимущество инфракрасной фотографии заключается в ее неразрушающем характере и относительной простоте применения, что делает ее ценным инструментом для предварительного исследования и документирования культурного наследия перед проведением более сложных и дорогостоящих анализов.

Для исследования культурного наследия, скрытого под водой, применяются сонарные технологии. Сонар (SOund NAvigation and Ranging) — это технология, использующая звуковые волны для обнаружения и картирования объектов под водой. Сонар испускает звуковой сигнал, который, отражаясь от подводных объектов, возвращается к приемнику. Анализируя время задержки и характеристики отраженного сигнала, сонар позволяет определить расстояние до объекта, его форму и положение. В сохранении культурного наследия сонарные технологии играют ключевую роль при исследовании подводных археологических объектов, таких как затонувшие корабли, древние поселения, подводные руины и другие культурные ценности, находящиеся на дне морей, озер и рек. Сонары позволяют картировать затонувшие объекты, определять их размеры, форму и степень сохранности, создавать трехмерные карты подводных ландшафтов и планировать подводные археологические экспедиции. Существуют различные типы сонаров, включая боковой обзорный сонар, который сканирует дно моря полосами с обеих сторон от буксируемого аппарата, и многолучевой эхолот, обеспечивающий более детальное трехмерное картирование дна. Сонарные технологии незаменимы для поиска, документирования и мониторинга подводного культурного наследия, которое часто остается недоступным для традиционных методов исследования.

Еще одним мощным инструментом в арсенале исследователей культурного наследия является гиперспектральное сканирование. В отличие от обычной фотографии, регистрирующей свет в ограниченном видимом диапазоне, и инфракрасной фотографии, фокусирующейся на инфракрасном спектре, гиперспектральное сканирование охватывает широкий спектральный диапазон, включающий видимый, инфракрасный и ультрафиолетовый свет, и регистрирует отраженный свет в



множестве узких спектральных диапазонов. Это позволяет получить детальную спектральную «подпись» для каждой точки на поверхности объекта, которая уникальна для различных материалов и пигментов. Анализируя эти спектральные данные, гиперспектральное сканирование обеспечивает возможность определить материальный состав объектов культурного наследия с высокой точностью и детализацией. Оно может быть использовано для идентификации пигментов, красителей и связующих веществ в произведениях живописи, определения типов камня и строительных материалов в архитектурных памятниках, анализа состава чернил и бумаги в исторических документах. Эта информация является ценной для атрибуции, датирования, изучения техники исполнения и разработки наиболее подходящих методов консервации и реставрации. Гиперспектральное сканирование, будучи неразрушающим и дистанционным методом, открывает новые возможности в исследовании материальной истории культурного наследия.

В последние десятилетия трехмерное моделирование превратилось в мощный инструмент сохранения культурного наследия, предоставляя беспрецедентные возможности для изучения, документирования и консервации исторических памятников и артефактов по всему миру. Многочисленные успешные международные проекты наглядно демонстрируют эффективность 3D-технологий в различных аспектах этой важной области.

Так, основанная в 2003 г. некоммерческая организация CyArk стала пионером в сфере цифрового сохранения культурного наследия. Путем использования лазерного сканирования и фотограмметрии CyArk осуществляет оцифровку объектов культурной значимости по всему миру, сотрудничая с местными партнерами на более чем 200 объектах в более чем 40 странах. Миссия CyArk заключается в применении технологий трехмерной записи для сохранения и передачи культурного наследия будущим поколениям [13].

Одной из ключевых разработок CyArk является платформа Tapestry — веб-платформа, предназначенная для создания захватывающих повествований вокруг объектов культурного наследия. Tapestry объединяет высокодетализированные 3D-модели с историями, культурным контекстом и эмоциональным опытом, связанным с каждым местом. В основе платформы лежит 3D-модель высокого разрешения, служащая фундаментом для наложения различных структурированных повествовательных элементов, таких как звуковое сопровождение, архивные изображения и интервью с людьми, имеющими непосредственное отношение к объекту. Это позволяет пользователям совершить эмоционально насыщенное путешествие и глубже проникнуться историей и значением места.

Методология CyArk предусматривает комплексный подход к созданию виртуального опыта на платформе Tapestry, который начинается с глубоких консультаций и обсуждений с партнерами и ключевыми заинтересованными сторонами для определения целей проекта, основных тем и перспектив, а также интерпретационных элементов, связан-



ных с объектом. Эксперты CyArk помогают партнерам на основе физических особенностей объекта разработать компоненты, которые будут интегрированы в цифровой опыт.

Далее следуют полевые работы, при выполнении которых команды CyArk применяют передовые технологии, объединяя данные с устройств LiDAR — как воздушных, так и наземных — с фотограмметрией. Это приводит к созданию фототекстурированной 3D-модели с миллиметровым разрешением, детально фиксирующей основные области объекта. Параллельно проводятся интервью с членами местного сообщества, учеными и руководителями объекта.

На этапе постпроизводства CyArk тесно взаимодействует с партнерами в процессе совершенствования повествования и интеграции нарративных и вспомогательных элементов в трехмерную среду. Завершенный проект на платформе Tapestry публикуется и легко интегрируется в веб-сайты партнеров, обеспечивая доступ к опыту для глобальной аудитории и поддерживая кроссплатформенную совместимость на веб-сайтах, мобильных устройствах и планшетах.

Таким образом, деятельность CyArk иллюстрирует успешную модель применения трехмерного моделирования не только для фиксации физического состояния объектов культурного наследия, но и для создания интерактивных и эмоционально вовлекающих платформ. Это способствует более глубокому пониманию и сохранению культурных ценностей широкой общественностью.

Проект CyArk наглядно демонстрирует, как трехмерное моделирование может служить средством не только сохранения культурного наследия, но и его популяризации и углубленного изучения. Один из ярких примеров — «Расписная пещера Чумаш» в США.

Исторический парк штата Калифорния «Расписная пещера» (англ. Painted Cave State Historic Park) — небольшая пещера из песчаника, украшенная настенной росписью, создание которой приписывают индейцам племени чумаш. Она находится в 18 км к северо-западу от г. Санта-Барбара в штате Калифорния. До контакта с европейцами численность племени барбареньо чумаш превышала 15 тыс. человек, что делало их одним из крупнейших и наиболее влиятельных племен в Калифорнии [8]. Современный город Санта-Барбара, расположенный у подножия гор Санта-Инес, был столицей барбареньо, называвшейся в то время Сяхтун. Точная датировка внутренних росписей неизвестна, церемониальное использование пещеры прекратилось в 1700-е гг. с приходом испанцев. Тем не менее связь с пещерой не утрачена народом чумаш и сегодня. С момента основания парка в 1976 г. пещера остается доступной для сохранения этого непреходящего наследия народа чумаш [3].

В 2015 г. CyArk в партнерстве со средней школой Санта-Инес, Калифорнийскими парками штата и старейшиной племени чумаш Эрнестиной Игнасио-Де Сото провел 3D-документирование пещеры и окружающей среды, чтобы создать своего рода отправную точку для сохранения знаний и повышения осведомленности о культуре и историческом укладе жизни чумаш (рис. 1).

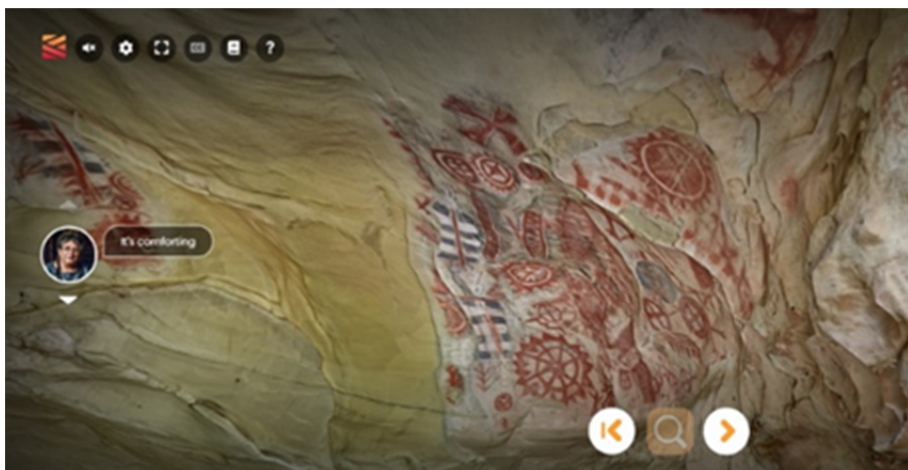


Рис. 1. Кадр из демонстрационного видеотура по пещере Чумаш [3]

В 2023 г. CyArk получил финансирование от California Park Foundation для обновления созданного 3D-тура, дополнив его новыми данными и включив новые интервью с Эрнестиной Игнасио-Де Сото [3].

Кроме того, проект CyArk успешно оцифровал множество других значимых культурных объектов. Одно из них — Великая мечеть Дженне, расположенная в городе Дженне, Мали. Она является крупнейшим в мире зданием из сырцового кирпича. Построенная преимущественно из высушенных на солнце глиняных кирпичей, покрытых глиной, мечеть представляет собой знаковое воплощение западноафриканской исламской культуры. Признана объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО в 1988 г. [9]. Будучи центром общины Дженны, мечеть также является одной из самых известных достопримечательностей Африки. Ежегодно местная община собирается на фестиваль для ремонта и повторного оштукатуривания стен мечети, и эта практическая деятельность по поддержанию сооружения становится одновременно символическим жестом общественного единства и сохранения культуры.

В рамках проекта CyArk была создана 3D-модель Великой мечети Дженне, на основе которой разработан демонстрационный видеотур (рис. 2). Созданный демонстрационный видеотур позволяет совершить интерактивное путешествие по этому уникальному архитектурному памятнику, знакомя зрителей с его историей, архитектурными особенностями и культурным значением. Такой подход открывает новые возможности для популяризации культурного наследия и его сохранения для будущих поколений.

Несомненно, данный пример служит наглядной иллюстрацией того, как современные технологии могут быть использованы для обеспечения виртуального доступа к объектам культурного наследия и их долгосрочного цифрового сохранения [5].

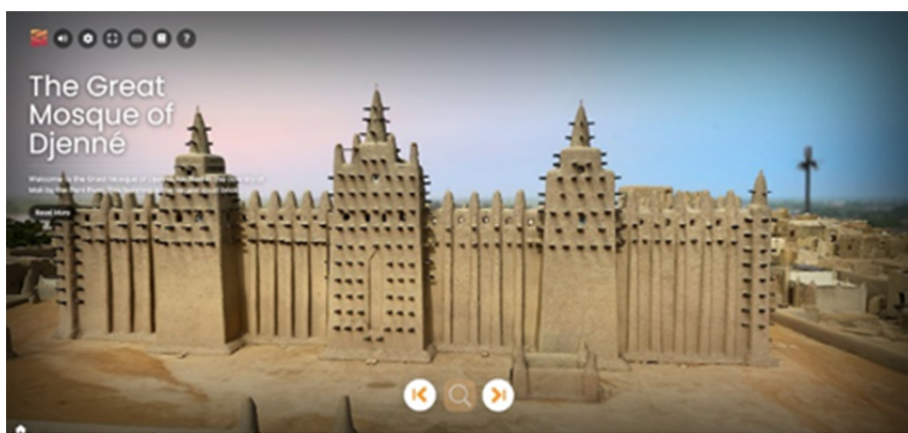


Рис. 2. Кадр из демонстрационного видеотура по Великой мечети Дженне [5]

Проекты CyArk демонстрируют значимость цифровых технологий в сохранении и популяризации культурного наследия. Однако глобальные усилия по сохранению исторических объектов не прекращаются. Еще один примечательный проект, заслуживающий внимания, — это «Возрождение Рима: Полет над Древним Римом» от компании Flyover Zone [6]. Он представляет собой обновленную интерактивную 3D-реконструкцию Древнего Рима, доступную через приложение или на сайте Yorescape [4].

Цифровая реконструкция позволяет пользователям совершить виртуальное путешествие по Риму 320 г. н.э., в период его наивысшего расцвета, за десять лет до того, как император Константин Великий перенес столицу Римской империи в Константинополь. Виртуальная экскурсия включает в себя ключевые достопримечательности Рима IV в.: Колизей, Большой цирк, мавзолей Августа, Пантеон, базилика Максенция, императорские дворцы, храмы и памятники на Капитолийском холме, а также термы императора Каракаллы.

Идейным вдохновителем и создателем обновленной версии стал Бернард Фришер, широко признанный знаток археологии Рима, профессор Школы информатики, вычислительной техники и инженерии Университета Индианы в Блумингтоне (США) [10]. По его словам, проект направлен как на исследовательские цели, так и на интересы туристов, что делает его универсальным инструментом для научного сообщества и широкой публики. Фришер подчеркивает, что этот проект представляет собой результат более чем двадцатисемилетних исследований, реализованных с применением новейших цифровых технологий. «Надеемся, что людям будет интересно узнать о древнеримском культурном наследии. Виртуальный тур может не только подготовить туристов к посещению города, но и помочь им освежить впечатления по возвращении домой», — отметил Бернард Фришер в интервью итальянскому информационному агентству ANSA [7].



Проект Flyover Zone демонстрирует, как технологии моделирования могут способствовать не только сохранению культурного наследия, но и его популяризации и исследованию, предоставляя возможности для виртуального взаимодействия с историческими объектами.

Международные проекты демонстрируют высокий уровень технологий, масштабные инвестиции и основаны на глубокой интеграции технических и гуманитарных наук, а также на способности адаптироваться к новым вызовам, что позволяет воспроизводить объекты с исключительной точностью и воссоздавать «живые» цифровые копии уникальных памятников. Несмотря на значительные возможности, внедрение и долгосрочное использование трехмерного моделирования в сфере культурного наследия сопряжено с рядом существенных ограничений и вызовов. Эти сложности охватывают финансовые, технические, правовые и этические аспекты, требующие комплексного анализа.

Применение 3D-моделирования сопряжено со значительными финансовыми затратами на приобретение и обслуживание высокоточного оборудования (например, 3D-сканеры Artec Leo, Eva, Spider II), лицензирование специализированного программного обеспечения, а также обучение и поддержание квалификации персонала. Даже фотограмметрия, считающаяся более доступной, влечет за собой высокие общие расходы на масштабные проекты. Прямая зависимость качества цифрового продукта от объема финансирования создает барьеры для учреждений с ограниченными ресурсами, особенно в развивающихся регионах. Это усугубляет «цифровой разрыв», ограничивая возможности некоторых культур полноценно представлять свое наследие в цифровом пространстве, что делает их ценности менее заметными, доступными и более уязвимыми.

Проекты 3D-оцифровки культурного наследия характеризуются высокой сложностью, зависящей от оборудования, условий съемки и характеристик объекта. Обработка данных лазерного сканирования или фотограмметрии требует значительных вычислительных мощностей и специализированного ПО для преобразования «облаков точек» в высококачественные 3D-модели. Отсутствие международных стандартов для планирования и реализации таких проектов приводит к разнородности данных и проблемам с интероперабельностью. Существуют значительные пробелы и различия в знаниях между экспертами по наследию, ИТ-специалистами и геодезистами, что усугубляет «цифровой разрыв» и требует постоянного обновления навыков.

Чрезмерное использование технологий может привести к «переинтерпретации» или искажению культурного наследия, когда фокус смещается на саму технологию. 3D-реконструкции иногда чрезмерно полагаются на воображение или визуальные дополнения, что может исказить общественное понимание и лишить объект аутентичности. Это поднимает вопрос о «чистоте медиаопыта»: избыток цифровых



элементов и интерактивного контента может отвлекать аудиторию от сути наследия, скрывая его глубокий смысл за технической демонстрацией. Фундаментальный вопрос об аутентичности и целостности цифровых репрезентаций возникает, если искусственный интеллект или сложная обработка данных вводят информацию, отсутствующую в оригинале, или «заполняют» пробелы, что подрывает ценность цифровой записи как надежного исторического источника.

Высокодетализированные 3D-модели и сопутствующие «сырые» данные требуют значительных объемов хранения, но основная проблема заключается в технологическом устаревании. Цифровые данные имеют очень короткий срок жизни: носители информации и форматы быстро устаревают. Проприетарные форматы данных, более не поддерживаемые графические примитивы и устаревшие операционные системы могут сделать данные недоступными или неинтерпретируемыми в будущем. Технологии презентации данных меняются примерно каждые четыре года, что ставит под угрозу цифровую непрерывность и эффективность инвестиций в оцифровку. Для обеспечения долгосрочной сохранности необходимы комплексные стратегии, включающие архивирование конечных моделей, «сырых» данных, технических описаний систем, калибровочных данных, используемого программного обеспечения и документации процедур. Рекомендуется регулярное перемещение данных на новые форматы и носители, а также использование эмуляции для запуска старого ПО. Принципы FAIR (Findability, Accessibility, Interoperability, Reusability) являются ключевыми для обеспечения устойчивого управления и повторного использования данных в будущем, что критически важно для обеспечения финансовой и академической целесообразности проектов.

Авторское право защищает оригинальные 3D-модели, но возникают сложности, если объект находится в общественном достоянии: точная копия такого объекта может не подпадать под новое авторское право. Это создает напряжение между стремлением учреждений к открытому доступу и их желанием получать доход от лицензирования изображений. Распространение технологий, например использование фотogramметрии на смартфонах, позволяет посетителям музеев создавать 3D-модели экспонатов без разрешения, что известно как «партизанское сканирование». Эти модели могут быть загружены, распространены и даже коммерциализированы в обход культурных прав собственности и суверенитета данных коренных народов. В оцифровке культурного наследия существует конфликт между авторскими правами, правом собственности и публичными / коммерческими интересами. Баланс между правами создателей / владельцев и общественным доступом / коммерческим использованием остается серьезной проблемой. Это не просто юридическая проблема, а этическая дилемма, связанная с тем, кто получает выгоду от цифровизации культурного наследия. Отсутствие четких рамок может привести к «цифровому присвоению»



и подрыву доверия между учреждениями и сообществами-источниками. Для устойчивого развития цифрового наследия необходимо разработать новые правовые и этические рамки, которые гармонизируют принципы открытого доступа (FAIR) с принципами контроля и ответственности (CARE), особенно в отношении коренных народов.

Несмотря на значительные ресурсы, задействованные в таких проектах, отечественная практика также начинает активно осваивать данные технологии для сохранения историко-культурного облика регионов. 14 марта 2025 г. Музей янтаря впервые применил метод фотограмметрии для создания точных 3D-моделей экспонатов. Сотрудники музея, используя профессиональное сканирующее оборудование, фиксировали объекты в условиях 3D-фотостудии, а затем обрабатывали полученные изображения специализированным программным обеспечением, формирующим облако точек. Это позволило добиться высокой точности в передаче структуры, текстуры и цветовых характеристик янтаря — вещества, сложного для фотографирования из-за неоднородной прозрачности и разнообразных световых эффектов. По словам кураторов проекта, это дает «возможность показать янтарь с разных сторон и сохранить его 3D-модели на будущее», что подчеркивает значимость безопасного оцифрования хрупких экспонатов. Полученные 3D-модели используются для виртуальных выставок, реставрационных планирований и научных исследований, способствуя развитию междисциплинарного подхода при анализе материалов культурного наследия [14].

Трехмерное моделирование в корне изменило наши подходы к изучению, документированию и популяризации культурного наследия, становясь основополагающим инструментом в арсенале современных технологий. Примеры успешных проектов, таких как инициативы CyArk и «Возрождение Рима» от Flyover Zone, служат убедительным подтверждением тому, что 3D-технологии позволяют создавать живые и эмоционально вовлекающие цифровые репрезентации исторических объектов.

Пример деятельности CyArk демонстрирует, что использование лазерного сканирования и фотограмметрии обеспечивает документирование объектов культурного наследия с беспрецедентной точностью. Проекты, такие как оцифровка Расписной пещеры Чумаш и Великой мечети Дженне, показывают, каким образом цифровые модели могут служить мощным средством для создания интерактивных и образовательных платформ, обеспечивая глобальной аудитории доступ к культурным ценностям и углубляя понимание их исторического и культурного значения.

Проект «Возрождение Рима» от Flyover Zone предоставляет пользователям уникальную возможность совершить виртуальное путешествие по Древнему Риму, каким он был в 320 г. н. э. Цифровая реконструкция позволяет полностью погрузиться в эпоху расцвета Римской империи, исследуя ключевые достопримечательности, такие как Колизей и Пантеон. Этот проект призван обеспечить как исследовательские цели, так и потребности туристов, становясь универсальным инструментом.



Заключение

Методы трехмерного моделирования, такие как высокоточная лазерная съемка, компьютерная томография и гиперспектральный анализ, позволяют всесторонне исследовать памятники различного типа и масштаба — от архитектурных ансамблей до хрупких артефактов. Так, гиперспектральное сканирование дает возможность с высокой точностью и детализацией определить материальный состав объектов, что является ценным для атрибуции, датировки и разработки эффективных методов консервации.

Будущее трехмерного моделирования в деле сохранения культурного наследия предполагает дальнейший рост доступности технологий, совершенствование программного обеспечения, а также активное международное сотрудничество и обмен опытом. В контексте совершенствования программного обеспечения значительный потенциал несет в себе развитие интегрированных платформ, способных объединять данные, полученные различными методами 3D-сканирования (например, путем лазерного сканирования, фотограмметрии, гиперспектрального анализа), в единые, высокодетализированные модели. Примером успешных решений может служить разработка специализированных модулей в таких программах, как Agisoft Metashape или RealityCapture, которые позволяют автоматизировать процессы обработки больших объемов данных и повысить точность реконструкций. Также развитие облачных решений и искусственного интеллекта (ИИ) для автоматической обработки и анализа данных сканирования способно существенно сократить временные и ресурсные затраты, делая технологии более доступными. ИИ, в частности, может быть использован для распознавания и классификации объектов, автоматической коррекции ошибок сканирования и даже для генерации отсутствующих фрагментов на основе имеющихся данных, как это демонстрируют передовые исследования по компьютерному зрению.

Для расширения доступности технологий ключевую роль играет разработка открытых стандартов данных и создание репозиторий для хранения и обмена 3D-моделями культурного наследия, что ведет к более широкому распространению и повторному использованию ценной информации. Проекты наподобие Sketchfab или Europeana уже предоставляют платформы для публикации 3D-моделей, обеспечивая популяризацию и открытый доступ к культурным ценностям. Кроме того, создание образовательных программ и курсов по 3D-моделированию для специалистов в области культурного наследия, а также внедрение этих технологий в школьные и университетские программы, будет способствовать формированию кадров, способных эффективно применять и развивать данные методы. Международные инициативы, такие как проекты, реализуемые в рамках программы Horizon Europe, демон-



стрируют успешную интеграцию научных исследований, технологических разработок и образовательных усилий, направленных на повышение доступности и применимости передовых цифровых инструментов для сохранения культурного наследия.

Список литературы

1. Единый государственный реестр объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации // Портал открытых данных МК РФ. URL: <https://opendata.mkrf.ru/opendata/7705851331-egrkn/> (дата обращения: 01.02.2025).
2. Стенограмма парламентских слушаний на тему «Сохранение объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации: программный подход и законодательственное обеспечение». 09.12.2024 // Совет Федерации Федерального собрания Российской Федерации. URL: <http://council.gov.ru/media/files/X1Ad4iZN6tStxT0uhAa9DNvwquoa3mQ.pdf> (дата обращения: 03.03.2025).
3. Пещера Чумаш. Цифровой проект сохранения культурного наследия, представленный некоммерческой организацией CyArk // Cyark.org. URL: <https://www.cyark.org/projects/chumash-painted-cave/overview> (дата обращения: 08.01.2025).
4. Yorescape : [официальный сайт]. URL: <https://www.yorescape.com/> (дата обращения: 08.04.2025).
5. Великая мечеть Дженне // Cyark.org. URL: <https://www.cyark.org/projects/djenne-mosque/overview> (дата обращения: 08.01.2025).
6. Flyover Zone : [официальный сайт]. URL: <https://www.flyoverzone.com/> (дата обращения: 08.04.2025).
7. New edition of Rome virtual aerial tour released // Ansa. URL: https://www.ansa.it/english/news/lifestyle/arts/2023/11/08/new-edition-of-rome-virtual-aerial-tour-released_34c6f48a-b1bc-4164-9541-6d7b71ee8b31.html (дата обращения: 02.02.2025).
8. Yosemite. National Park California // National Park Service : [официальный сайт]. URL: <https://www.nps.gov/yose/index.htm> (дата обращения: 08.04.2025).
9. Всемирный список объектов культурного наследия ЮНЕСКО. URL: <https://whc.unesco.org/ru/list/> (дата обращения: 18.01.2025).
10. Indiana University Bloomington. URL: <https://bloomington.iu.edu/> (дата обращения: 04.04.2025).
11. Кочнева А.А. Методика построения цифровых моделей рельефа по данным воздушного лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ. 2017. Т. 22, №2. С. 44–54. EDN: YZFXGV.
12. Хабарова И.А., Валиев Д.С., Чугунов В.А., Хабаров Д.А. Современная цифровая фотограмметрия // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2019. №4-2. С. 41–47. EDN: UHTRZF.
13. Сарафанова А.Г., Сарафанов А.А. Технологии смешанной реальности в туристской сфере // Научный результат. Технологии бизнеса и сервиса. 2021. Т. 7, №4. С. 20–33. doi: 10.18413/2408-9346-2021-7-4-0-3.
14. Музей янтаря впервые стал использовать метод фотограмметрии для оцифровки экспонатов из музейных фондов // Музей янтаря : [официальный сайт]. URL: <https://www.ambermuseum.ru/news/all/muzey-yanarya-vpervye-stal-ispolzovat-metod-fotogrammetrii-dlya-otsifrovki-eksponatov-iz-muzeynykh/> (дата обращения: 08.04.2025).



Об авторах

Даниил Аманов — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: daniil.amanov23@vk.com

Владислав Алексеевич Купин — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: VKupin@stud.kantiana.ru

Анна Владимировна Митрофанова — канд. геогр. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: mitrofanova-anaa@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9565-8574

SPIN-код: 9698-7700

D. Amanov, V. A. Kupin, A. V. Mitrofanova

INTERNATIONAL EXPERIENCE IN THE APPLICATION OF THREE-DIMENSIONAL MODELING FOR THE PRESERVATION OF CULTURAL HERITAGE

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Received 19 April 2025

Accepted 26 June 2025

doi: 10.5922/vestniknat-2025-3-2

For cite this article: Amanov D., Kupin V.A., Mitrofanova A.V., 2025, International experience in the application of three-dimensional modeling for the preservation of cultural heritage, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural Sciences*, №3. P. 22—38. doi: 10.5922/vestniknat-2025-3-2.

Modern digital technologies play a key role in the preservation of cultural heritage, providing new opportunities for its study and documentation. One of the most promising methods is three-dimensional modeling, which makes it possible to create accurate digital copies of historical objects. The purpose of this study is to analyze international practices of implementing 3D modeling in the field of preservation of architectural and archaeological monuments. Methods of laser scanning, photogrammetry, and hyperspectral analysis are examined, along with their advantages and limitations. Particular attention is given to examples of successful international projects, such as CyArk and Flyover Zone, which demonstrate the effectiveness of 3D modeling in the preservation and popularization of cultural assets. The main conclusions of the study concern the prospects for the development of digital methods of heritage preservation, their integration into global practice, and the need for further interdisciplinary cooperation.

Keywords: cultural heritage, digital technologies, 3D modeling, virtual reconstruction, laser scanning, photogrammetry, hyperspectral analysis



The authors

Daniil Amanov, Master's student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: daniil.amanov23@vk.com

Vladislav A. Kupin, Master's student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: VKupin@stud.kantiana.ru

Dr Anna V. Mitrofanova, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: mitrofanova-anaa@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9565-8574

SPIN-code: 9698-7700