

Сравнительный анализ методов 3D-документации объектов культурного наследия Узбекистана: фотограмметрия против лазерного сканирования в условиях ограниченных ресурсов

(English conceptual title: "Comparative Analysis of 3D Documentation Methods for Cultural Heritage Sites in Uzbekistan: Photogrammetry vs. Laser Scanning under Resource Constraints")

A.A. Bahromov¹

e-mail: asrorbek.bahromov2112@gmail.com

F.A. Jo'raboyev²

e-mail: fozil93fja@gmail.com

R.T. Gaipnazarov³

e-mail: gaipnazarovs.uds@gmail.com

Tashkent University of Applied Sciences, Department of "Computer Engineering" Head of the department¹

Tashkent University of Applied Sciences, Department of "Computer Engineering" Teacher²

Tashkent University of Applied Sciences, Department of "Computer Engineering" Teacher³

Аннотация (Abstract)

Актуальность: Сохранение богатого архитектурного наследия Узбекистана требует эффективных методов 3D-документации, однако выбор оптимальной технологии затруднен из-за ограниченности ресурсов.

Цель: Провести сравнительный анализ наземного лазерного сканирования (TLS) и фотограмметрии (SfM) для документирования объектов культурного наследия Узбекистана, оценив их точность, стоимость, эффективность и доступность.

Методы: Исследование основано на систематическом обзоре научной литературы, анализе кейс-стади и теоретическом сравнении TLS и SfM по критериям точности, полноты данных, качества текстуры, стоимости оборудования и ПО, трудозатрат и требований к квалификации. Анализ адаптирован к специфике объектов и ресурсным ограничениям Узбекистана.

Результаты: TLS обеспечивает высокую точность, но требует значительных инвестиций. SfM является значительно более доступной альтернативой, способной достигать сопоставимой точности и превосходного качества текстур при правильном применении, хотя и более требовательна к вычислительным ресурсам и условиям съемки. Выявлены сильные и слабые стороны каждого метода применительно к типичным объектам и материалам наследия Узбекистана.

Заключение: SfM представляет собой экономически эффективное решение для многих задач 3D-документации в Узбекистане, особенно при ограниченном бюджете. TLS остается важным для высокоточных задач, а гибридный подход часто является оптимальным. Выбор технологии должен основываться на конкретных целях проекта и доступных ресурсах. Инвестиции в обучение персонала критически важны для успешного внедрения.

Ключевые слова (Keywords): 3D документация, культурное наследие, Узбекистан, фотограмметрия, лазерное сканирование, сравнительный анализ, ограниченные ресурсы, НВИМ.

Объекты культурного наследия являются не просто свидетелями прошлого, но и неотъемлемой частью идентичности наций и всего человечества. Их сохранение – это сохранение исторической памяти, культурного многообразия и источника знаний для будущих поколений. Узбекистан, расположенный на перекрестке древних цивилизаций Великого Шелкового пути, обладает уникальным и богатейшим архитектурным наследием, включающим величественные ансамбли Самарканда, Бухары, Хивы, признанные объектами Всемирного наследия ЮНЕСКО, а также множество других ценных памятников по всей стране. Эти сооружения, отличающиеся сложной геометрией, изысканным декором (глазурованная плитка, резьба по ганчу и дереву) и использованием традиционных строительных материалов, представляют собой бесценное достояние, но одновременно и крайне уязвимую материю.

Неумолимое течение времени, воздействие климатических факторов (перепады температур, ветровая и водная эрозия), сейсмическая активность региона, а также антропогенное давление создают постоянную угрозу физическому состоянию этих уникальных объектов. Традиционные методы документации, такие как ручные обмеры, чертежи и фотофиксация, безусловно, внесли свой вклад в изучение и сохранение наследия, однако они зачастую не способны обеспечить необходимую точность, полноту и объективность данных, особенно при работе со сложными формами и поверхностями. Более того, они трудоемки и требуют значительных временных затрат. В этих условиях остро встает вопрос о применении современных цифровых технологий, способных кардинально повысить эффективность процессов документирования, мониторинга, реставрации и популяризации культурного наследия.

В последние десятилетия технологии трехмерной (3D) цифровой документации, в частности наземное лазерное сканирование (Terrestrial Laser Scanning, TLS) и фотограмметрия (особенно методы, основанные на анализе структуры из движения – Structure from Motion, SfM), произвели революцию в области сохранения наследия [1, 2]. Эти методы позволяют создавать высокоточные и детализированные цифровые 3D-модели объектов, фиксируя их геометрию и текстуру с беспрецедентной полнотой. Такие модели служат надежной основой для:

- Архивации текущего состояния памятника ("цифровой слепок").
- Мониторинга деформаций и изменений во времени.
- Разработки научно обоснованных проектов реставрации и консервации.
- Научных исследований в области истории архитектуры и строительных техник.
- Создания виртуальных реконструкций и образовательных ресурсов.
- Популяризации наследия через виртуальные туры и интерактивные приложения [3, 4].

Несмотря на очевидные преимущества, широкое внедрение передовых 3D-технологий в практику сохранения наследия в Узбекистане, как и во многих других странах с аналогичными экономическими условиями, сталкивается с серьезными препятствиями. Ключевой проблемой становится выбор оптимального метода документации в условиях ограниченных ресурсов – как финансовых, так и технических (наличие дорогостоящего оборудования, специализированного программного обеспечения, квалифицированных кадров) [5]. Лазерное сканирование, известное своей высокой точностью и скоростью сбора данных, требует значительных первоначальных инвестиций. Фотограмметрия, особенно с использованием доступных цифровых камер и развитием алгоритмов SfM, представляется более бюджетной

альтернативой, однако вопросы ее точности, трудоемкости обработки данных и применимости к различным типам объектов требуют тщательного изучения [6, 7].

Существующие исследования часто сравнивают TLS и фотограмметрию по техническим параметрам [8, 9] или на примере конкретных объектов в разных странах [10, 11]. Однако ощущается нехватка комплексного анализа, сфокусированного на специфике архитектурного наследия Центральной Азии, в частности Узбекистана, с его уникальными декоративными элементами и конструктивными особенностями. Кроме того, мало внимания уделяется сравнительной оценке этих методов именно с точки зрения **баланса между качеством получаемых данных, общей стоимостью (включая оборудование, ПО и трудозатраты) и доступностью для учреждений с типичными бюджетными ограничениями**. Заполнение этого пробела имеет важное практическое значение, поскольку может помочь организациям, ответственным за сохранение наследия в Узбекистане, сделать информированный выбор технологии, максимально соответствующей их задачам и возможностям.

Целью данной статьи является проведение сравнительного анализа двух ведущих методов 3D-документации – наземного лазерного сканирования (TLS) и фотограмметрии на основе SfM – применительно к объектам культурного наследия Узбекистана. Анализ будет сфокусирован на оценке их эффективности, точности, стоимости и доступности в условиях ограниченных ресурсов. На основе этого анализа будут разработаны практические рекомендации по выбору наиболее подходящего метода (или их комбинации) для решения конкретных задач документирования, мониторинга и реставрации архитектурных памятников в регионе.

Методы (Methods)

Данное исследование представляет собой **сравнительный анализ** двух ключевых технологий трехмерной документации – наземного лазерного сканирования (TLS) и фотограмметрии на основе метода Structure from Motion (SfM) – с целью оценки их применимости для документирования объектов культурного наследия Узбекистана в условиях ограниченных ресурсов. Ввиду отсутствия возможности проведения прямых полевых экспериментов с использованием обеих технологий на репрезентативных объектах, методология исследования базируется на **комплексном анализе вторичных данных**, включающем:

1. **Систематический обзор научной литературы:** Анализ рецензируемых статей, монографий, материалов конференций (например, CIPA Heritage Documentation, ISPRS Archives, Digital Heritage), посвященных применению, сравнению и оценке TLS и SfM в области документирования культурного наследия за последние 10-15 лет. Особое внимание уделялось публикациям, содержащим количественные и качественные оценки методов.
2. **Анализ опубликованных кейс-стади (case studies):** Изучение конкретных примеров применения TLS и SfM для документирования объектов, схожих по типу, материалам и сложности с архитектурным наследием Узбекистана (например, исламская архитектура, здания с богатым декором, археологические памятники).
3. **Теоретическое сравнение:** Сопоставление фундаментальных принципов работы, технических характеристик (на основе данных производителей и независимых обзоров), рабочих процессов и типичных результатов для каждого метода.
4. **Контекстуальная адаптация:** Интерпретация полученных данных и результатов сравнения применительно к специфическим условиям Узбекистана, включая климатические

особенности, характерные типы архитектурных объектов и их материалов, а также типичные бюджетные и кадровые ограничения учреждений, занимающихся охраной памятников.

Определения сравниваемых методов

- **Наземное лазерное сканирование (TLS):** Активный метод дистанционного зондирования, при котором сканер испускает лазерный луч и измеряет время его возвращения (Time-of-Flight, ToF) или сдвиг фазы (Phase-Shift) после отражения от поверхности объекта. Это позволяет с высокой скоростью и точностью определять трехмерные координаты миллионов точек на поверхности, формируя так называемое "облако точек" (point cloud) [12].
- **Фотограмметрия (SfM):** Пассивный метод, основанный на получении множества цифровых фотографий объекта с разных ракурсов с высоким перекрытием. Специализированное программное обеспечение анализирует эти изображения, автоматически идентифицируя общие точки на разных снимках и, используя принципы стереозрения и алгоритмы Structure from Motion, вычисляет параметры камеры (положение, ориентацию) и трехмерные координаты этих точек, создавая разреженное, а затем и плотное облако точек. В дальнейшем это облако может быть преобразовано в полигональную сетку (mesh) и текстурировано с использованием исходных фотографий [7, 13].

Критерии сравнительного анализа

Сравнение TLS и SfM проводилось по следующему набору ключевых критериев, охватывающих весь цикл работ – от полевого этапа до получения конечного продукта:

1. **Геометрическая точность и разрешение:** Оценка достижимой точности измерений (абсолютной и относительной), плотности получаемого облака точек и способности метода передавать мелкие детали рельефа поверхности. Анализировались факторы, влияющие на точность (расстояние до объекта, характеристики поверхности, калибровка).
2. **Полнота данных и работа со сложными поверхностями:** Способность методов захватывать сложную геометрию без "мертвых зон" (окклюзий). Эффективность при работе с различными материалами, характерными для наследия Узбекистана (например, блестящая глазурованная плитка, темное резное дерево, пористый ганч), которые могут по-разному взаимодействовать с лазерным лучом или создавать проблемы при поиске соответствий на фото.
3. **Качество текстуры (цвета):** Возможность получения реалистичной и точной цветовой информации. Сравнение разрешения и качества текстур, получаемых с помощью встроенных камер сканеров и отдельных цифровых фотокамер, используемых в фотограмметрии.
4. **Эффективность полевых работ:** Затраты времени на сбор данных на объекте. Требования к условиям освещения (TLS менее зависим, SfM требует хорошего, равномерного освещения). Чувствительность к погодным условиям. Необходимость расстановки референсных маркеров.
5. **Стоимость оборудования:** Сравнение порядка цен на приобретение базовых комплектов оборудования (лазерный сканер среднего класса vs. цифровая зеркальная/беззеркальная камера с объективами, штатив, возможно, дрон для аэросъемки). Учет стоимости аксессуаров (мишени, вехи, ноутбук).
6. **Стоимость и доступность программного обеспечения:** Анализ стоимости лицензий на специализированное ПО для обработки данных TLS (часто проприетарное) и SfM (существуют как коммерческие пакеты, так и мощные бесплатные/open-source решения).

7. **Трудоёмкость и сложность обработки данных:** Требования к вычислительным ресурсам (мощность компьютера, объем памяти). Время, необходимое на обработку данных (сшивка сканов/выравнивание фотографий, построение плотного облака, создание сетки, текстурирование). Уровень сложности ПО и требуемая квалификация оператора для получения качественного результата.
8. **Требования к квалификации персонала:** Необходимый уровень подготовки специалистов для проведения полевых работ и камеральной обработки данных для каждого метода.
9. **Форматы выходных данных и интероперабельность:** Типичные форматы экспорта данных (облака точек, сетки) и их совместимость с широко используемым ПО для дальнейшей работы (CAD, GIS, BIM/НВIM, рендеринг).



Рис 1. Рабочий процесс фотограмметрии (SfM)

Результаты (Results)

Сравнительный анализ наземного лазерного сканирования (TLS) и фотограмметрии на основе Structure from Motion (SfM) для документирования объектов культурного наследия, подобных архитектурным памятникам Узбекистана, выявил существенные различия в их характеристиках, возможностях и требованиях. Результаты сравнения по ключевым критериям представлены ниже.

1. Геометрическая точность и разрешение

- **TLS:** Современные лазерные сканеры, особенно фазовые и ToF среднего и высокого класса, обеспечивают высокую абсолютную точность измерений, часто достигающую миллиметрового или субмиллиметрового уровня на типичных для архитектурной документации дистанциях [14]. Плотность облака точек высока, но зависит от расстояния до

объекта и углового разрешения сканера. TLS напрямую измеряет геометрию, что минимизирует ошибки масштабирования при правильной регистрации сканов.

- **SfM:** Точность фотограмметрии сильно зависит от множества факторов: качества и разрешения камеры, оптики, геометрии съемки (перекрытие снимков, углы конвергенции), стабильности освещения, наличия и точности опорных точек (Ground Control Points, GCPs) или масштабных линеек [7, 15]. При оптимальных условиях и использовании GCPs, точность SfM может приближаться к точности TLS, однако достижение стабильно высокой абсолютной точности требует более тщательного планирования и контроля [9]. Разрешение (плотность точек) может быть очень высоким, потенциально превышая TLS для хорошо текстурированных участков при съемке с близкого расстояния, но может резко падать на слаботекстурированных поверхностях.

2. Полнота данных и работа со сложными поверхностями

- **TLS:** Являясь технологией прямой видимости, TLS подвержен возникновению "теней" или окклюзий за выступающими элементами. Для получения полной модели требуется сканирование с множества позиций, что увеличивает время полевых работ и сложность последующей регистрации (сшивки) сканов [16]. Некоторые материалы, характерные для наследия Узбекистана, создают трудности: блестящие глазурированные поверхности могут вызывать множественные отражения или поглощение луча, а темные или влажные поверхности – слабое отражение, что приводит к шуму или пропускам данных [17].

- **SfM:** Фотограмметрия потенциально лучше справляется с окклюзиями за счет большей гибкости в выборе ракурсов съемки. Однако она критически зависит от наличия достаточного количества уникальных визуальных признаков (текстуры) на поверхности для надежного сопоставления точек на разных снимках. Монотонные, повторяющиеся (как в некоторых орнаментах) или бликующие поверхности (глазурь, полированный камень) могут привести к ошибкам выравнивания камер или пробелам в реконструкции [18]. Для получения полной модели сложных резных или лепных декоров требуется большое количество снимков с разных ракурсов и под разными углами освещения.

3. Качество текстуры (цвета)

- **TLS:** Многие современные сканеры оснащены встроенными фотокамерами для окрашивания облака точек. Однако разрешение и качество этих камер часто уступают профессиональным фотокамерам, используемым в SfM. Могут возникать проблемы с параллаксом (несовпадение оптических осей сканера и камеры), балансом белого и равномерностью освещения между разными сканами [19].

- **SfM:** Метод изначально основан на фотографиях, что позволяет получать высококачественные, детализированные и фотореалистичные текстуры при использовании хорошей оптики и правильной экспозиции. Разрешение текстуры напрямую связано с разрешением исходных снимков и расстоянием до объекта [13]. SfM обеспечивает естественное соответствие геометрии и текстуры.

4. Эффективность полевых работ

- **TLS:** Скорость сбора данных с одной позиции сканирования очень высока (миллионы точек в секунду). Однако общее время полевых работ определяется необходимостью перемещения и установки сканера на множество позиций для минимизации окклюзий, а также расстановкой и измерением координат референсных сфер или марок для точной регистрации

[16]. TLS менее чувствителен к условиям освещения и может работать в сумерках или даже ночью (при отсутствии движущихся объектов).

- **SfM:** Время съемки зависит от размера и сложности объекта, требуемого разрешения и количества необходимых ракурсов (от сотен до тысяч снимков). Процесс может быть более трудоемким, чем сканирование с одной точки, но более гибким в плане доступа к труднодоступным местам (особенно при использовании дронов для съемки крыш и верхних ярусов) [20]. SfM критически зависит от стабильного и достаточного освещения; движущиеся объекты (люди, листва) могут создавать артефакты.

5. Стоимость оборудования

- **TLS:** Стоимость профессиональных наземных лазерных сканеров остается высокой, варьируясь от нескольких десятков до более ста тысяч долларов США/евро, в зависимости от класса точности, дальности и скорости [5]. Это представляет собой значительный барьер для многих учреждений в Узбекистане.

- **SfM:** Базовый комплект оборудования для качественной фотограмметрии (зеркальная или беззеркальная камера с хорошим объективом, штатив) значительно доступнее – его стоимость может быть на порядок или даже два ниже стоимости TLS [5, 21]. Использование дронов добавляет стоимость, но все равно остается в более доступном ценовом диапазоне по сравнению с TLS.

6. Стоимость и доступность программного обеспечения

- **TLS:** Программное обеспечение для обработки данных TLS (регистрация, очистка, сегментация облаков точек) часто является проприетарным и поставляется производителями сканеров или сторонними компаниями, что влечет за собой дополнительные лицензионные расходы [16].

- **SfM:** На рынке существует широкий выбор ПО для фотограмметрической обработки: от мощных коммерческих пакетов (например, Agisoft Metashape, RealityCapture, Bentley ContextCapture) с различными вариантами лицензирования до высококачественных бесплатных и открытых решений (например, Meshroom, COLMAP, OpenDroneMap), что делает технологию более доступной [22].

7. Трудоемкость и сложность обработки данных

- **TLS:** Обработка данных TLS, особенно регистрация (сшивка) множества сканов, может быть сложной и требовательной к опыту оператора, хотя современные алгоритмы частично автоматизируют этот процесс. Объем данных (облака точек) может быть очень большим, требуя мощных рабочих станций [16].

- **SfM:** Фотограмметрическая обработка, особенно этапы выравнивания снимков и построения плотного облака точек, является крайне ресурсоемким процессом, требующим значительных вычислительных мощностей (особенно GPU) и времени (от часов до дней для больших проектов) [13, 22]. Хотя многие этапы автоматизированы, получение оптимального результата часто требует ручного вмешательства, маскирования, редактирования облака точек и сетки.

8. Требования к квалификации персонала

- **TLS:** Требуется обученных специалистов для работы со сканером, планирования съемки, выполнения регистрации и обработки данных. Ошибки на этапе полевых работ или регистрации трудно исправимы.

- **SfM:** Полевая съемка кажется интуитивно проще, но для получения качественных данных, пригодных для точной реконструкции, необходимо понимание основ фотограмметрии (правильное перекрытие, углы, освещение, параметры камеры). Обработка данных в специализированном ПО также требует определенных навыков и опыта для настройки параметров и решения возникающих проблем [21].

9. Форматы выходных данных и интероперабельность

- Оба метода способны генерировать стандартные форматы данных: облака точек (LAS, LAZ, E57, PTS, PLY), полигональные сетки (OBJ, PLY, FBX, STL). Эти форматы совместимы с большинством CAD, GIS, BIM/НВІМ платформ и ПО для 3D-моделирования и визуализации, что обеспечивает хорошую интероперабельность для дальнейшего использования данных [23].

Таблица 1: Сводное сравнение TLS и SfM для документации наследия

Критерий	Наземное Лазерное Сканирование (TLS)	Фотограмметрия (SfM)	Примечания (Контекст Узбекистана)
Геометрическая точность	Высокая (мм-субмм), стабильная	Переменная (от высокой до средней), зависит от условий, GCPs	TLS предпочтительнее для мониторинга деформаций; SfM достаточна для многих задач при контроле.
Разрешение / Детализация	Высокая плотность, зависит от расстояния	Потенциально очень высокая (особенно на текстурах), зависит от камеры/расстояния	SfM может лучше передавать мелкий декор при близкой съемке.
Полнота данных (Окклюзии)	Склонность к "теням", требует много станций	Более гибкая съемка, но проблемы на слаботекстурированных участках	Гибридный подход или дрон-SfM могут решить проблему окклюзий для обоих методов.
Работа со сложн. поверх.	Проблемы с блестящими/темными/влажными поверхностями	Проблемы с монотонными/бликующими/повторяющимися текстурами	Актуально для глазурь, ганча, темного дерева; требует тестов или адаптации методик.
Качество текстуры	Среднее (встроенные камеры), возможен параллакс	Высокое (зависит от камеры/оптики), фотореалистичное	SfM имеет явное преимущество для визуально насыщенных объектов наследия Узбекистана.
Эффективность полевых работ	Быстро со станции, но долго из-за перестановок; не зависит от света	Медленнее (много снимков), но гибче; критична к освещению	TLS удобнее при сжатых сроках на объекте; SfM требует планирования под освещение.

Стоимость оборудования	Очень высокая	Низкая / Средняя (камера, ПК, дрон опционально)	Ключевой барьер для TLS; SfM значительно доступнее для учреждений Узбекистана.
Стоимость ПО	Высокая (часто проприетарное)	От бесплатного/открытого до коммерческого (средняя)	Наличие open-source SfM ПО – важное преимущество.
Сложность обработки	Средняя/Высокая (регистрация); большие объемы данных	Высокая (ресурсоемкость, время); требует мощного ПК (GPU)	SfM требует больших вычислительных мощностей, что может быть ограничением.
Требования к персоналу	Требует обученных специалистов (TLS)	Требует понимания фотограмметрии и навыков обработки (SfM)	Оба метода требуют квалификации; SfM может иметь более низкий порог входа для <i>начала</i> работы.
Интероперабельность	Хорошая (стандартные форматы)	Хорошая (стандартные форматы)	Оба метода хорошо интегрируются с CAD/BIM/GIS.

Обсуждение (Discussion)

Представленные результаты сравнительного анализа наземного лазерного сканирования (TLS) и фотограмметрии (SfM) выявляют сложную картину компромиссов при выборе оптимальной технологии для 3D-документации богатого и разнообразного культурного наследия Узбекистана. Очевидно, что не существует единственного "лучшего" метода; выбор должен определяться конкретными целями проекта, характеристиками объекта, доступными ресурсами и требуемым уровнем детализации и точности.

Интерпретация результатов в контексте Узбекистана

Ключевым фактором, определяющим выбор технологии в условиях Узбекистана, как и предполагалось во Введении, является **ограниченность ресурсов**. Высокая стоимость приобретения и обслуживания TLS-систем [5] делает их недоступными для многих местных музеев, реставрационных центров и даже университетов. В этом свете, значительно более низкая стоимость входа в фотограмметрию [21], требующую лишь качественной цифровой камеры и доступа к (потенциально бесплатному) программному обеспечению [22], делает ее чрезвычайно привлекательной и реалистичной альтернативой.

Однако доступность не должна достигаться ценой неприемлемого снижения качества. Результаты показывают, что при строгом соблюдении методологии съемки и обработки, SfM способна обеспечивать точность, сопоставимую с TLS для многих задач документирования наследия [9, 15]. Это особенно важно для Узбекистана, где многие объекты характеризуются сложной геометрией и богатым, но иногда поврежденным декором (резьба по ганчу, мозаика, терракота). Способность SfM генерировать высококачественные фотореалистичные текстуры [13] является еще одним значительным преимуществом при документировании таких визуально насыщенных объектов, поскольку текстура несет не меньше информации, чем геометрия.

В то же время, выявленные слабости SfM также необходимо учитывать. Проблемы с реконструкцией слаботекстурированных, монотонных или бликующих поверхностей [18] могут быть актуальны для некоторых элементов узбекской архитектуры (например, большие гладкие купола, полированные каменные детали, фрагменты с утраченной полихромной росписью). В таких случаях прямое геометрическое измерение с помощью TLS, менее зависимое от текстуры, может дать более надежные результаты, несмотря на потенциальные проблемы с отражающими материалами [17]. Кроме того, стабильно высокая точность TLS [14] делает его предпочтительным методом для задач, требующих максимальной метрической достоверности, таких как мониторинг деформаций или создание точных обмерных чертежей для реставрации.

Трудоемкость обработки данных SfM и высокие требования к вычислительным ресурсам [13, 22] также являются существенным фактором. Хотя стоимость ПО может быть низкой, необходимость в мощных компьютерах и длительном времени обработки может стать "узким местом" для организаций с ограниченной IT-инфраструктурой. Обработка данных TLS, хотя и требует специализированного ПО и навыков [16], может быть менее ресурсоемкой на этапе генерации облака точек.

Практические рекомендации и матрица выбора

Исходя из анализа, можно предложить следующие практические рекомендации для организаций Узбекистана, занимающихся 3D-документацией наследия:

1. **Для крупномасштабных проектов с высокими требованиями к точности и при наличии финансирования:** TLS остается предпочтительным методом, особенно для создания базовой геометрической основы для мониторинга или сложных инженерных реставрационных проектов. Его способность быстро охватывать большие площади с гарантированной точностью оправдывает инвестиции в таких случаях.
2. **Для проектов с ограниченным бюджетом, акцентом на визуальную документацию и текстуру, а также для объектов со сложным рельефом:** SfM представляет собой мощную и доступную альтернативу. Она особенно эффективна для создания детализированных моделей отдельных зданий, декоративных элементов, археологических раскопов. Качество результата напрямую зависит от тщательности полевой съемки и возможностей обработки.
3. **Гибридный подход:** Во многих случаях оптимальным решением может стать комбинация методов [24]. Например, TLS может использоваться для создания общего высокоточного каркаса объекта (особенно для крупных сооружений), а SfM – для детализации отдельных зон с богатым декором или для получения высококачественных текстур, которые затем накладываются на геометрию, полученную сканированием. Аэросъемка с дронов (форма фотограмметрии) незаменима для документирования крыш и верхних ярусов, труднодоступных для наземного сканера [20].
4. **Инвестиции в обучение:** Независимо от выбранной технологии, ключевым фактором успеха являются знания и навыки персонала. Необходимо инвестировать в обучение специалистов основам как TLS, так и SfM, включая планирование съемки, обработку данных и контроль качества. Использование открытого ПО для SfM может высвободить средства для такого обучения.
5. **Разработка стандартов:** Целесообразно разработать локальные методические рекомендации или стандарты по 3D-документации для объектов наследия Узбекистана, учитывающие специфику объектов и рекомендующие конкретные подходы (TLS, SfM,

THE MULTIDISCIPLINARY JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

VOLUME-5, ISSUE-5

гибридный) в зависимости от задач (архивация, мониторинг, реставрация, виртуализация) и доступных ресурсов.

Таблица 2: Матрица выбора метода 3D-документации для наследия Узбекистана

Задача / Цель документации	Основной фактор	Рекомендуемый метод(ы)	Ключевые соображения
Архивная документация (Общая)	Баланс цена/качество	SfM	Доступно, хорошее качество текстур. Требуется тщательной съемки и обработки.
Высокоточная архивация	Геометрическая точность	TLS	Максимальная точность геометрии. Высокая стоимость.
Мониторинг деформаций	Абсолютная точность	TLS	Наиболее надежный метод для выявления малых изменений геометрии.
Основа для реставрации (Обмеры)	Точность, полнота	TLS или Гибридный	TLS для каркаса, SfM для детализации сложных участков/текстур.
Документация декора (Резьба, Мозаика)	Детализация, Текстура	SfM	Лучшее качество текстур, высокая детализация при близкой съемке.
Виртуальная реальность / Музеи	Фотореализм, Текстура	SfM	Оптимально для создания визуально привлекательных моделей.
Образовательные цели	Доступность, Наглядность	SfM	Низкий порог входа для обучения студентов основам 3D-документации.
Крупные комплексы / Территории	Скорость охвата, Точность	TLS или Гибридный (с дроном)	TLS для наземной части, SfM (дрон) для крыши и общей территории.
Проекты с мин. бюджетом	Минимальная стоимость	SfM (с open-source ПО)	Наиболее экономичный вариант при наличии камеры и ПК.

Сравнение с другими исследованиями и ограничения

Полученные выводы в целом согласуются с международной практикой и результатами других сравнительных исследований [8, 9, 21], подтверждая тенденцию к более широкому использованию SfM как доступной альтернативы или дополнения к TLS. Однако уникальность

данной работы заключается в акценте на контексте Узбекистана и анализе баланса "качество-стоимость-доступность" для местных условий.

Основным ограничением данного исследования является его теоретический характер, основанный на анализе вторичных данных. Отсутствие собственных полевых экспериментов не позволяет дать окончательные количественные оценки точности и трудозатрат для конкретных типов объектов узбекского наследия. Кроме того, технологии TLS и SfM постоянно развиваются, появляются новые алгоритмы и оборудование, что может изменить баланс сил в будущем.

Направления будущих исследований

Данная работа открывает перспективы для дальнейших исследований. Необходимы **полевые апробации** предложенных подходов на пилотных объектах в Узбекистане для получения конкретных данных о точности, трудозатратах и оптимальных рабочих процессах. Интересным направлением является исследование **эффективности гибридных методик**, сочетающих TLS, наземную и воздушную SfM. Также актуально изучение возможностей интеграции полученных 3D-моделей с платформами **Heritage Building Information Modeling (HBIM)** [25] для создания комплексных информационных моделей объектов наследия Узбекистана, объединяющих геометрию, атрибутивную информацию и данные мониторинга.

Заключение (Conclusion)

Сохранение уникального и богатого культурного наследия Узбекистана в цифровую эпоху требует эффективных и точных методов трехмерной документации. Данное исследование было посвящено сравнительному анализу двух ведущих технологий – наземного лазерного сканирования (TLS) и фотограмметрии на основе Structure from Motion (SfM) – с целью определения их пригодности для использования в условиях ограниченных ресурсов, характерных для многих учреждений страны.

Анализ показал, что выбор между TLS и SfM не является однозначным и зависит от специфики задач, требований к точности и детализации, а также, в значительной степени, от бюджетных и технических возможностей. TLS обеспечивает высокую геометрическую точность и скорость сбора данных, что делает его идеальным для крупномасштабных проектов и задач мониторинга, однако его высокая стоимость остается серьезным препятствием. SfM, будучи значительно более доступной по стоимости оборудования и программного обеспечения (включая открытые решения), представляет собой мощную альтернативу, способную обеспечить сопоставимую точность и превосходное качество текстур при тщательном соблюдении методологии. Ее гибкость и возможность использования недорогих камер и даже дронов делают ее особенно перспективной для широкого внедрения в Узбекистане.

Ключевой вывод исследования заключается в том, что **фотограмметрия (SfM) является высокоэффективным и экономически оправданным решением для многих задач 3D-документации культурного наследия Узбекистана**, особенно при ограниченных ресурсах. Однако для проектов с максимальными требованиями к точности или при работе с объектами, имеющими специфические проблемы для фотограмметрии, **TLS остается важным инструментом**, а **гибридный подход**, сочетающий сильные стороны обеих технологий, часто может быть оптимальным решением.

Успешное внедрение любой из этих технологий требует не только инвестиций в оборудование, но и в развитие компетенций специалистов. Результаты данного анализа и предложенные

рекомендации могут служить основой для принятия обоснованных решений организациями, ответственными за сохранение наследия в Узбекистане, способствуя более эффективной и доступной цифровой документации бесценных памятников архитектуры для будущих поколений. Дальнейшие полевые исследования и апробация методик на конкретных объектах позволят уточнить и дополнить сделанные выводы.

Список литературы (References)

1. Remondino, F., & Campana, S. (Eds.). (2014). *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage: Theory and Best Practices*. Archaeopress Publishing Ltd.
2. Grussenmeyer, P., Landes, T., Voegtle, T., & Ringle, K. (2008). Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B5), 213-218.
3. Ioannides, M., Fink, E., Brumana, R., Patias, P., Doulamis, A., Martins, J., & Wallace, M. (Eds.). (2016). *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection*. Springer International Publishing.
4. Stylianidis, E., & Remondino, F. (Eds.). (2016). *3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage*. Whittles Publishing.
5. Boehler, W., & Marbs, A. (2004). 3D scanning and photogrammetry: A rough comparison regarding efficiency and accuracy. *Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*, Corfu, Greece, 1-2.
6. Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2014). *Close-range photogrammetry: principles, methods and applications*. Whittles Publishing.
7. Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
8. Kersten, T. P., Przybilla, H. J., & Lindstaedt, M. (2017). Comparative investigations into the geometric accuracy of close-range photogrammetry and terrestrial laser scanning. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W3, 387-394.
9. Fernández-Palacios, B. J., Morita, M. M., & Barba, S. (2017). Comparative analysis between TLS and SfM photogrammetry to generate BIM models of existing buildings. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W5, 267-273.
10. Alshawabkeh, Y., & Baik, A. (2020). Integration of TLS and SfM Photogrammetry for Heritage BIM Enhancement. *Remote Sensing*, 12(3), 385.
11. Fassi, F., Mandelli, A., Perfetti, L., & Rossi, M. (2013). Comparison between laser scanning and automated 3D modelling techniques to reconstruct complex objects. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W2, 267-274.
12. Vosselman, G., & Maas, H. G. (Eds.). (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing.
13. Snavely, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2008). Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2), 189-210.

14. Reshetyuk, Y. (2009). *Investigation of the geometrical quality of terrestrial laser scanning data*. Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology.
15. Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1-15.
16. Historic England. (2018). *3D Laser Scanning for Heritage: Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture*. Second Edition.
17. Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M., & Villaverde, V. (2010). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37(3), 499-507.
18. Remondino, F., Spera, M. G., Nocerino, E., Menna, F., & Nex, F. (2014). State of the art in high density image matching. *The Photogrammetric Record*, 29(146), 144-166.
19. Al-Manasir, K., & Fraser, C. S. (2006). Registration of terrestrial laser scanner data using imagery. *The Photogrammetric Record*, 21(115), 255-268.
20. Champion, E. (2019). The role of virtual reality and digital methods in preserving cultural heritage. In *Research Methods for Digital Heritage* (pp. 111-128). Facet Publishing.
21. McCarthy, J. (2014). Multi-image photogrammetry as a practical tool for cultural heritage recording. *Research Report Series (University of Southern Queensland. Faculty of Engineering and Surveying)*, (1).
22. Open Drone Map Community. (n.d.). *OpenDroneMap Documentation*. Retrieved from <https://docs.opendronemap.org> (Пример ссылки на документацию ПО)
23. Logothetis, S., Delinasiou, A., & Stylianidis, E. (2015). Building Information Modelling for Cultural Heritage: A review. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W4, 317-323.
24. Barazzetti, L., Binda, L., Scaioni, M., & Taranto, P. (2010). Photogrammetry and laser scanning for historical complex structures survey: The Musmeci bridge. *Geoinformatics FCE CTU*, 5, 1-10.
25. Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2013). Historic Building Information Modelling (HBIM). *Structural Survey*, 31(4), 311-327.
26. Bahromov A.A., Ibodullayev S.N. "A Variety of Virtual Reality Implementations For Creative Learning and 5 Ways to Implement Virtual Reality in The Learning Process". IJEAIS ISSN: 2643-640X Vol. 4, Issue 9, September – 2020, Pages: 60-63.
27. Бекназарова С.С., Бахромов А.А., Ибодуллаев С.Н. "Графовая модель описания процессов электронной торговой площадки". *Social and Economic Aspects of Education in Modern Society*. Vol.1, May 25, 2019, Warsaw, Poland
28. Бекназарова С.С., Бахромов А.А., Ибодуллаев С.Н. "Описания процессов электронной торговой площадки графовой моделью". *Научные разработки: Евразийский регион*. 20 мая, 2019, Москва
29. G'iyosov U.E., Nuraliyev F.M., Ibodullayev S.N., "Metaverse muhitida virtual 3D universitetini qurish uchun dasturiy vositasini ishlab chiqish va loyihalashtirish". *Me'morchilik va qurilish muammolari (ilmiy-texnik jurnal) 2024, №3, Samarqand*.
30. Nuraliyev F.M., G'iyosov U.E, Ibodullaev S.N., "Ta'limning virtual olamdagi ko'rinishi uchun 3D obektlarni joylashtirish va foydalanish usullari". // *Raqamli iqtisodiyot va axborot texnologiyalari elektron ilmiy jurnali*, 2022, 2-son.