Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ
(МИИГАиК)»**

на правах рукописи



Мочалов Александр Валерьевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ

Специальность 1.6.19 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
Кандидат технических наук,
Алтынов Александр Ефимович

МОСКВА 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

РАЗДЕЛ 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ ... 15

1.1 Нормативно-правовые аспекты документирования объектов археологического наследия 15

1.2 Современный подход к документированию объектов археологического наследия 17

1.3 Проблемы современного подхода к документированию объектов археологического наследия 21

1.4 Фотограмметрическая модель как основа для документирования объектов археологического наследия 24

1.5 Обоснование требований к фотограмметрической модели объекта археологического наследия 28

Выводы по разделу 1 34

РАЗДЕЛ 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СЪЕМКИ ДЛЯ ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ 36

2.1 Разработка опытного образца стереосистемы с фиксированным базисом для документирования объектов археологического наследия 38

2.1.1 Обоснование выбора цифровой камеры для фотограмметрической видеосъемки 38

2.1.2 Расчет параметров стереосистемы 40

2.1.3 Опытный образец стереосистемы 52

2.2 Калибровка стереосистемы 56

2.3 Обработка результатов фотограмметрической видеосъемки, полученной стереосистемой с фиксированным базисом 59

2.3.1 Синхронизация видеозаписей и формирование стереопар 61
2.3.2 Алгоритм построения фотограмметрической модели по стереопарам с известным базисом 66
2.4 Оценка точности синхронизации видеозаписей и измерительной способности стереосистемы 72
2.5 Методика выполнения фотограмметрической съемки объектов археологического наследия с использованием разработанной стереосистемы . 77
Выводы по разделу 2 91
РАЗДЕЛ 3. АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ 92
3.1 Экспериментальная апробация разработанной методики фотограмметрической съемки на контрольном археологическом объекте 92
3.2 Апробация разработанной методики в рамках Новороссийской археологической экспедиции 102
Выводы по разделу 3 109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 111
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ 114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 115
ПРИЛОЖЕНИЕ А 128
ПРИЛОЖЕНИЕ Б 129
ПРИЛОЖЕНИЕ В 130
ПРИЛОЖЕНИЕ Г 131
ПРИЛОЖЕНИЕ Д 132
ПРИЛОЖЕНИЕ Е 133

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж 134

ПРИЛОЖЕНИЕ З 135

ПРИЛОЖЕНИЕ И 137

ПРИЛОЖЕНИЕ К 138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность диссертационной работы. Полевые работы на объектах археологического наследия направлены на получение научной информации, проверку исследовательских гипотез, а также обеспечение сохранности выявленных объектов и артефактов. При этом такие работы имеют существенное ограничение: доступ к объекту обычно возможен только в период их проведения. После завершения раскопок, как правило, выполняется консервация объекта археологического наследия, что затрудняет повторное получение данных и часто требует организации нового полевого этапа. Поэтому особое значение приобретает документирование ОАН, позволяющее сохранить сведения о форме объекта, его размерах, положении отдельных элементов, их взаимном расположении и внешнем виде. Применение цифровых технологий фиксации позволяет сохранять эти данные в измеряемой форме, повторно обращаться к материалам после завершения полевых работ, выполнять необходимые измерения и использовать полученные данные при подготовке чертежей, описаний и научной отчетной документации.

Наиболее распространенными способами пространственной фиксации в археологии являются: геодезические измерения, оптическое сканирование, наземное лазерное сканирование, фотограмметрические методы. Геодезические методы обеспечивают высокую точность определения координат отдельных точек, однако требуют последовательного выполнения измерений и не позволяют оперативно получить подробные данные о форме и поверхности всего объекта. Оптическое сканирование обеспечивает высокую детальность трехмерной модели, однако вследствие ограниченной области сканирования и небольшого рабочего расстояния применяется преимущественно для документирования отдельных археологических артефактов, а не протяженных объектов археологического наследия. Наземное лазерное сканирование позволяет регистрировать большое количество точек поверхности объекта и определять их пространственные координаты с высокой точностью, однако значительная стоимость

специализированного оборудования ограничивает широкое применение метода в археологических исследованиях. Наиболее доступным и распространенным методом остается фотограмметрия благодаря сравнительно невысокой стоимости оборудования, гибкости применения и широким возможностям последующей обработки изображений.

Вместе с тем традиционная фотограмметрия имеет ряд ограничений при документировании археологических раскопов. Получение качественных материалов фотограмметрическим методом требует тщательного проектирования съемки, соблюдения перекрытий, выбора траектории и контроля геометрии сети снимков, что повышает трудоемкость работ и усиливает зависимость результата от опыта исполнителя. Кроме того, метрические свойства производных пространственных данных в значительной степени зависят от качества уравненного блока фототриангуляции, внешней координатной привязки и наличия опорных данных (координаты центров фотографирования и опорные точки), что в полевых условиях не всегда обеспечивается с необходимой надежностью. Отдельной проблемой остается отсутствие единой методологической базы, регламентирующей сам процесс съемки, полевую подготовку объекта, фотограмметрическую обработку, а также оценку качества получаемых пространственных данных.

С учетом особенностей ОАН как объекта пространственной фиксации основными требованиями к цифровым технологиям его документирования являются: оперативность съемки, воспроизводимость результатов, снижение влияния человеческого фактора, обеспечение геометрической точности, а также фотореалистичности поверхности объекта.

В связи с этим актуальной является разработка комплексной методики документирования ОАН, основанной на технологии наземной фотограмметрической съемки. В качестве решения задачи с учетом особенностей ОАН предлагается использование технологии фотограмметрической видеосъемки с помощью стереосистемы с фиксированным базисом фотографирования, ориентированной на повышение устойчивости съемочного процесса и получение

пространственных данных на ОАН в масштабе, определенном при помощи фиксированного базиса фотографирования стереосистемы. Использование видеосъемки позволяет обеспечить избыточность наблюдений и более стабильные перекрытия, а фиксированная геометрия стереосистемы повышает воспроизводимость результатов обработки. Предлагаемые результаты исследования могут быть востребованы при проведении полевых археологических работ, а также при совершенствовании и стандартизации процедур цифрового документирования объектов археологического наследия.

Степень разработанности темы исследования. В развитие методов трехмерного цифрового моделирования значительный вклад внесли российские ученые Чибуничев А. Г., Князь В. А., Комиссаров В.А., Скрыпицына Т. Н., Лобанов А. Н., Михайлов А. П., Блохинов Ю. Б., Журкин И. Г. и др. Их исследования направлены на совершенствование методов фотограмметрической обработки изображений, разработку алгоритмов ориентирования и реконструкции, повышение точности выходных результатов, а также на развитие аппаратно-программных средств получения цифровых моделей. Среди зарубежных специалистов существенный вклад в развитие данного направления внесли Gruen A., Luhmann T., Atkinson K. B., Hartley R., Lasaponara R. и другие ученые. В их исследованиях особое внимание уделяется автоматизации построения трехмерных моделей, развитию многокамерных и фотограмметрических систем, а также повышению устойчивости результатов к внешним условиям съемки и погрешностям исходных данных.

Отдельное значение для настоящего исследования имеют работы, посвященные многокамерным системам съемки, обеспечивающим единомоментное получение изображений с разных ракурсов. Такие системы особенно важны при получении высокоточных пространственных данных в условиях движения съемочной системы, когда временны́е задержки между кадрами могут приводить к геометрическим искажениям и снижению точности фотограмметрической обработки. Исследования в этой области направлены на совершенствование конструкции съемочных систем, обоснование их параметров и

формирование методов обработки данных, обеспечивающих требуемую точность определения пространственных координат и построения фотограмметрических моделей.

В области археологии исследования, связанные с применением фотограмметрических технологий, ведутся российскими учеными: Коробовым Д. С., Зайцевой О. В., Сосновским И. А., – а также рядом зарубежных специалистов, среди которых Traversari G., Forte M., Robinson M. Их работы направлены на использование фотограмметрии и пространственных данных для документирования археологических раскопов, фиксации стратиграфических ситуаций, построения цифровых моделей объектов археологического наследия и включения результатов в систему полевой и камеральной документации. Эти исследования подтверждают перспективность применения фотограмметрических методов для документирования ОАН в процессе полевых археологических работ, однако вопросы разработки методик их практического применения остаются недостаточно изученными.

Целью диссертационного исследования является разработка методики фотограмметрической съемки для документирования объектов археологического наследия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) спроектировать и изготовить опытный образец стереосистемы с фиксированным базисом фотографирования для наземной фотограмметрической видеосъемки объектов археологического наследия и выполнить ее калибровку;

2) разработать алгоритм синхронизации видеозаписей левой и правой камер и формирования стереопар для последующей фотограмметрической обработки;

3) обосновать основные параметры наземной фотограмметрической видеосъемки, включая параметры камер, маршруты и траектории съемки, углы наклона оптических осей и другие параметры съемочного процесса;

4) разработать методику выполнения наземной фотограмметрической видеосъемки объектов археологического наследия с использованием стереосистемы с фиксированным базисом;

5) предложить алгоритм фотограмметрической обработки стереопар, обеспечивающий масштабирование и ориентирование фотограмметрической модели;

6) обосновать требования к геометрической точности фотограмметрической модели и пространственному разрешению исходных изображений, необходимым для документирования объектов археологического наследия;

7) выполнить экспериментальную и полевую апробацию разработанной методики и оценить точность получаемых фотограмметрических моделей;

8) исследовать возможность передачи и повторного использования результатов уравнивания блока фототриангуляции с сохранением метрической точности фотограмметрической модели.

Объектом исследования является методика наземной фотограмметрической видеосъемки с использованием стереосистемы с фиксированным базисом.

Предметом исследования является документирование объектов археологического наследия.

Научные результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1. Впервые предложена методика наземной фотограмметрической видеосъемки объектов археологического наследия с использованием стереосистемы с фиксированным базисом.

2. Разработан алгоритм синхронизации видеозаписей по звуковым дорожкам и формирования стереопар.

3. Разработана конструкция и изготовлен опытный образец стереосистемы с фиксированным базисом фотографирования, выполнена его калибровка.

4. Обоснованы основные параметры выполнения фотограмметрической видеосъемки, включая параметры камер, маршруты и траектории съемки, а также углы наклона оптических осей.

5. Предложен алгоритм фотограмметрической обработки стереопар с масштабированием и ориентированием фотограмметрической модели.

6. Обоснованы требования к геометрической точности фотограмметрической модели и пространственному разрешению исходных изображений.

7. Выполнена экспериментальная и полевая апробация разработанной методики.

8. Подтверждена возможность передачи и повторного использования результатов уравнивания блока фототриангуляции с сохранением геометрической точности фотограмметрической модели.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

1. Предложенная методика наземной фотограмметрической видеосъемки с использованием стереосистемы с фиксированным базисом представляет собой новое научно-методическое решение в наземной фотограмметрии, ориентированное на документирование объектов археологического наследия. Совмещение непрерывной видеосъемки с фиксированным взаимным положением камер позволяет формировать последовательность стереопар с известным базисом фотографирования и использовать его для определения масштаба фотограмметрической модели, что обеспечивает получение измеримых моделей непосредственно по материалам видеосъемки и расширяет возможности применения видеоданных в наземной фотограмметрии.

2. Разработанный алгоритм синхронизации видеозаписей и формирования стереопар является новым решением для подготовки исходных данных фотограмметрической съемки. Алгоритм основан на анализе звуковых дорожек, обеспечивает точное временно́е согласование видеозаписей с последующим формированием стереопар и позволяет использовать в составе стереосистемы цифровые камеры без дополнительных аппаратных средств

синхронизации, расширяя возможности построения многокамерных фотограмметрических съемочных систем.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в совершенствовании методов наземной фотограмметрической съемки и алгоритмов фотограмметрической обработки для повышения качества документирования объектов археологического наследия.

Практическая значимость работы состоит в следующем.

1. Предложенная методика фотограмметрической съемки обеспечивает получение ориентированных и масштабированных фотограмметрических моделей с точностью и детализацией, необходимыми для документирования объектов археологического наследия.

2. Разработанный алгоритм синхронизации видеозаписей и формирования стереопар позволяет подготавливать набор исходных данных, пригодный для обработки в современных цифровых фотограмметрических системах.

3. Опытный образец стереосистемы, методика выполнения съемки и алгоритмы обработки данных внедрены в практику документирования объектов археологического наследия ИА РАН и ИВ РАН.

4. Результаты исследования могут применяться при проведении археологических полевых работ, подготовке отчетной документации, мониторинге состояния и сохранении объектов археологического наследия. Разработанные решения могут использоваться научными и образовательными организациями, археологическими экспедициями, музеями-заповедниками, проектными и реставрационными организациями, а также органами государственной охраны объектов культурного наследия.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационного исследования использованы основные положения наземной фотограмметрической съемки и фотограмметрической обработки изображений для обоснования параметров съемки и построения фотограмметрических моделей. Методы системного и сравнительного анализа применялись для анализа существующих

способов документирования объектов археологического наследия и выбора технических решений. С помощью методов математической статистики и оценки точности обрабатывались экспериментальные данные и определялась точность полученных результатов. Экспериментальный метод применялся для апробации разработанной стереосистемы, алгоритмов обработки данных и методики съемки в лабораторных и полевых условиях.

Эмпирическую базу исследования составили материалы фотограмметрической съемки археологических объектов, полученные с применением разработанной стереосистемы на контрольном объекте при проведении археологических изысканий перед строительством, а также в ходе работ Новороссийской археологической экспедиции ИА РАН.

Экспериментальная и полевая апробация методики выполнена на одном контрольном объекте и шести объектах археологического наследия.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная методика фотограмметрической съемки для документирования объектов археологического наследия, основанная на видеосъемке стереосистемой с фиксированным базисом, содержит новый научно-методический подход к получению измеримых фотограмметрических моделей. Предложенный подход развивает методы наземной фотограмметрической съемки и обеспечивает документирование объектов археологического наследия с требуемой точностью и детализацией.

2. Разработанный алгоритм синхронизации видеозаписей и формирования стереопар, основанный на анализе звуковых дорожек, содержит новый подход к временно́му согласованию видеозаписей, полученных двумя цифровыми камерами. Предложенный подход развивает способы формирования исходных данных для фотограмметрической обработки и позволяет использовать в составе стереосистем цифровые камеры без дополнительных аппаратных средств синхронизации.

Тема диссертации соответствует пунктам паспорта научной специальности 1.6.19 «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

(технические науки)»: п. 9 «Теория и методы получения изображений. Разработка и исследование технических средств и технологий, фиксирующих в виде изображений различные элементы объектов исследований. Методы повышения качества аэрокосмических изображений» и п. 13 «Теория, методы и технологии создания трехмерных моделей объектов земной поверхности, инженерных и других объектов на основе различных видов съемки (оптическая, радиолокационная, лазерно-локационная и др.)».

Степень достоверности полученных в диссертационной работе результатов основана на экспериментальных исследованиях, выполненных с использованием разработанной фотограмметрической стереосистемы с фиксированным базисом, и апробировании в условиях реальных полевых археологических работ.

Основные положения диссертационной работы и полученные результаты докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

– Пятой международной конференции «Археология и геоинформатика», ИА РАН, г. Москва, 25–27 мая 2021 г.;

– Шестой международной конференции «Археология и геоинформатика», ИА РАН, г. Москва, 24–26 мая 2023 г.;

– II Международной конференции «Цифровое востоковедение», ИВ РАН, г. Москва, 9 декабря 2025 г.;

– 81-й Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, МИИГАиК, г. Москва, 13–17 апреля 2026 г.

Результаты диссертационного исследования внедрены в практику ИА РАН и ИВ РАН.

Публикации по теме диссертации. По результатам диссертационного исследования получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693254, опубликованы 1 монография и 4 научные работы, в том числе 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 23 таблицы и 24 рисунка. Объем диссертации составляет 138 страниц. Библиографический список включает 104 наименования.

РАЗДЕЛ 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ

1.1 Нормативно-правовые аспекты документирования объектов археологического наследия

В соответствии со ст. 3 Федерального закона от 25.06.2002 № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» под объектом археологического наследия понимаются «частично или полностью скрытые в земле или под водой следы существования человека в прошлых эпохах (включая все связанные с такими следами археологические предметы и культурные слои), основным или одним из основных источников информации о которых являются археологические раскопки или находки. Объектами археологического наследия являются в том числе городища, курганы, грунтовые могильники, древние погребения, селища, стоянки, каменные изваяния, стелы, наскальные изображения, остатки древних укреплений, производств, каналов, судов, дорог, места совершения древних религиозных обрядов» [43].

Согласно п. 7 ст. 45.1 Федерального закона № 73-ФЗ основным источником информации об объекте археологического наследия являются археологические раскопки, которые определяются как «проведение на поверхности земли, в земле или под водой научных исследований объектов археологического наследия посредством земляных и связанных с ними работ, в том числе с полным или частичным изъятием археологических предметов из раскопов, в целях изучения и сохранения объектов археологического наследия». Основной документ, составляемый по результатам проведения полевых археологических работ, – научный отчет [43]. Состав научного отчета регламентирует Положение о порядке

проведения археологических полевых работ и составления научной отчетной документации [31].

Согласно положению о порядке проведения археологических полевых работ [31] для проведения археологических раскопок на объекте ОАН необходим ситуационный план, показывающий расположение объекта археологического наследия относительно водотоков и ближайших населенных пунктов, а также топографический план объекта археологического наследия и (или) его участка в масштабе 1:500–1:2000, отражающий его современное состояние.

В ходе археологических раскопок необходимо проведение графической и фотографической фиксации. В Положении [31] также уточняется, что допустимо применение ортофотопланов, которые изготавливаются в масштабах, установленных для чертежей. К графической фиксации относят:

а) планы раскопа на уровне дневной поверхности с нанесением сетки квадратов и контуров всех выраженных в рельефе археологических объектов;

б) пластовые либо послойные планы поверхностей (в том числе поверхности археологического материка) с нанесением обнаруженных археологических объектов, их остатков и следов, археологических предметов;

в) вертикальные проекции раскопа (разрезы) (при необходимости);

г) стратиграфические профили раскопа (борта раскопа, бровки);

д) планы, фасы стен, вертикальные проекции (разрезы) стратиграфических профилей заполнения отдельных археологических объектов;

е) планы раскопа с нанесением всех обнаруженных археологических объектов и их частей (при необходимости).

Для объектов археологического наследия каменного века чертежи изготавливаются в масштабах не менее чем 1:10, при необходимости 1:1, 1:2, 1:5. Для объектов археологического наследия иных хронологических периодов – в масштабах 1:10, 1:20, 1:40, 1:50 в зависимости от вида и индивидуальных особенностей объекта археологического наследия.

Фотографической фиксации подлежат:

1) общий вид объекта археологического наследия и отдельных его составляющих;

2) рабочие моменты, демонстрирующие применяемую методику;

3) участок проведения археологических раскопок до начала земляных работ и после проведения мероприятий по консервации и (или) рекультивации;

4) поверхности горизонтальных зачисток после разборки слоя/пласта;

5) поверхность археологического материка;

6) расчищенные археологические объекты, их детали и следы (в случае их полной либо частичной утраты);

7) индивидуальные археологические предметы (в том числе антропогенные, антропологические, палеозоологические и иные объекты), определенные держателем открытого листа как имеющие значение для определения хронологии и историко-культурной принадлежности объекта археологического наследия, в контексте их обнаружения;

8) стратиграфические профили (борта раскопа, бровки, профили заполнений археологических объектов). При этом для протяженных стратиграфических профилей обязательна не только общая, но и детализированная фиксация.

1.2 Современный подход к документированию объектов археологического наследия

В последние годы в российской археологии всё активнее применяются современные методы сбора пространственных данных об ОАН [13, 25, 40, 42]. В отличие от традиционных средств фиксации (фотографии, рисунка, чертежа и описания) современные цифровые методы документирования объекта обеспечивают более высокий уровень воспроизводимости и объективности за счет формирования более полного и метрически определенного набора данных об

объекте исследования. К материалам можно неоднократно возвращаться после окончания полевых работ, проводить дополнительные измерения, строить ортогональные проекции и сечения, проверять исследовательские гипотезы без повторного доступа к памятнику или находке [23]. Это позволяет снизить влияние человеческого фактора за счет объективности полученных данных и продлить срок использования первичных полевых данных, превращая их в устойчивую базу для последующего анализа и интерпретации.

Основной задачей внедрения является повышение автоматизации, а также улучшение качества документирования объектов археологического наследия. В процессе документирования ОАН можно выделить три основных этапа:

1) сбор данных об ОАН;
2) обработку данных;
3) хранение и работу с данными.

Этап 1. Сбор данных об объекте археологического наследия. Можно выделить следующие методы получения данных об объекте археологического наследия.

Геодезические методы подразумевают использование геодезического оборудования: электронных тахеометров, нивелиров, GNSS-приемников. Данное оборудование применяется для проведения топографической съемки, разбивки участка работы на квадраты, фиксации точек выявления артефактов, составления нивелирных планов [44].

Наземное лазерное сканирование предполагает применение стационарных или портативных лазерных сканеров для получения плотных облаков точек археологических объектов и участков раскопок. Используется для создания трехмерных моделей, ЦМР/ЦМП, составления чертежей раскопа и нивелирных планов, профилей/разрезов, а также вычисления объемов и контроля деформаций [76].

Метод оптического сканирования предполагает использование оптических сканеров, работа которых основана на структурированном освещении целевого объекта. Позволяет создавать высокоточные трехмерные модели с фотореалистичной

текстурой поверхности. Однако применение оптического сканирования в полевой археологии ограниченно, так как зависит от инфраструктуры (ноутбук, питание). В основном оно применяется для создания трехмерных моделей артефактов внутри раскопа [82] или трехмерных моделей музейных экспозиций.

Методы фотограмметрической съемки являются одним из основных средств фиксации археологических объектов [1, 14, 17], позволяя получать точные пространственные модели раскопов. Наземная фотограмметрия используется для детальной документации раскопов, стен, архитектурных элементов и стратиграфических разрезов. Фотограмметрическая съемка, выполняемая с борта воздушных носителей – самолетов или вертолетов, беспилотных воздушных судов, – применяется для масштабного картографирования территорий, обнаружения скрытых археологических структур, а также непосредственно при документировании ОАН. Методы фотограмметрии позволяют получать ортофотопланы, ЦМР/ЦМП, а также трехмерные модели ОАН.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что три из четырех рассматриваемых методов преимущественно ориентированы на получение данных с высокой степенью детализации, как геометрической, так и визуальной, для подготовки отчетной документации по объектам археологического наследия. При этом геодезические методы не исключаются из процесса: они выполняют функции технологического сопровождения полевых работ (создание и поддержание планово-высотного обоснования, координатная привязка, контроль точности, разбивка раскопов, выполнение нивелирования) и являются их неотъемлемой составляющей.

В настоящее время при проведении полевых археологических работ и документировании объектов археологического наследия применяются все вышеперечисленные методы фиксации и получения пространственных данных. Вместе с тем наиболее применим для документирования раскопа фотограмметрический метод [19, 86], что обусловлено его относительной доступностью, связанной с невысокой стоимостью оборудования, сравнительной простотой технологического процесса и оперативностью получения измеримых

материалов. Фотограмметрия обеспечивает высокую точность, объективность и достоверность фиксации за счет фотографического способа получения данных и высокой степени автоматизации обработки, что снижает субъективное влияние исследователя. Дополнительными преимуществами являются возможность повторных измерений по снимкам, документирование как объекта в целом, так и отдельных деталей, а также высокая фотореалистичность материалов, значимая для последующей камеральной обработки и интерпретации археологического контекста [16, 19].

Этап 2. Обработка данных. На этапе обработки данных можно выделить две основные стадии.

1. Предварительная обработка геоданных – обработка сырых данных, получаемых с помощью геодезического оборудования, систем лазерного сканирования, фотографических систем, пригодных для создания документов об ОАН (ортофотопланы, фотограмметрические модели, трехмерные модели, ЦМР/ЦМП, облака точек, результаты уравнивания тахеометрической съемки).

2. Подготовка документов об объекте археологического наследия – материалов, необходимых для формирования отчета о проведении работ (чертежи, профили, нивелирные планы).

На каждой стадии применяется большое количество различного программного обеспечения:

– на стадии предварительной обработки:

а) при обработке геодезических измерений: Credo Dat, Trimble (Trimble Business Center), Leica Geosystems (Leica Infinity / Leica Geo Office), Topcon Positioning Systems (Magnet Office);

б) при работе с данными лазерного сканирования: Leica Cyclone (Leica Geosystems), FARO SCENE (FARO Technologies), RiSCAN PRO (RIEGL);

в) при фотограмметрической обработке: Agisoft Metashape Professional (Agisoft), Pix4Dmapper (Pix4D), RealityCapture (Epic Games);

– на стадии подготовки документов об ОАН:

а) при работе с векторными данными (чертежами и планами): AutoCAD (Autodesk), nanoCAD (Nanosoft), CorelDRAW (Corel), QGIS, ArcGIS (Esri), CloudCompare, Blender;

б) при работе с растровыми данными (изображениями и графикой): Adobe Illustrator, Adobe Photoshop (Adobe).

Этап 3. Хранение и работа с данными. Современные археологические исследования сопровождаются работой с большим количеством данных, которые в основном являются пространственными, так как связаны с информацией о местоположении или имеют географический контекст. Такие данные формируют потребность в использовании геоинформационных систем для визуализации, анализа и работы с ними, что также дало большой толчок в развитии ГИС в области археологии [7, 41].

ГИС не только позволяют структурировать все полученные данные об объекте исследования, но и обеспечивают удобный доступ к ним.

Визуализация данных с помощью ГИС облегчает интерпретацию археологических объектов и способствует эффективному обмену научной информацией между исследователями.

1.3 Проблемы современного подхода к документированию объектов археологического наследия

Современные цифровые технологии значительно расширяют возможности археологических исследований, позволяя ускорять процесс фиксации данных, улучшать точность измерений и повышать наглядность материалов. Впрочем, несмотря на очевидные преимущества, их внедрение в полевые археологические работы сопровождается рядом обстоятельств. Технические средства и программные решения доступны и постоянно развиваются, однако их применение остается неоднородным, а результаты – трудно сопоставимыми. Это проявляется в нескольких взаимосвязанных проблемах.

Во-первых, осложняется стандартизация данных. В ходе полевых работ формируется широкий набор материалов: трехмерные модели, ортофотопланы, ЦМП и ЦМР, облака точек, результаты тахеометрической съемки, журналы нивелирования, сферические панорамы, фотографии, результаты магниторазведки, табличные данные. Эти материалы можно свести к четырем группам: векторным, растровым, трехмерным и текстовым, – а внутри групп выделить наиболее популярные форматы, которые приведены в таблице 1 [1].

Таблица 1 – Наиболее популярные типы данных и форматы

№	Тип данных	Форматы данных
1	Векторные	*.dwg, *.dxf, *.shp, *.kml, *.cdr, *.json
2	Растровые	*.jpg, *.GeoTIFF
3	Трехмерные	*.kmz, *.obj, *.b3dm, *.dae, *.glb, *.gltf, *.las
4	Текстовые	*.txt, *.csv, *.doc, *.xls

Фактически на практике параллельно используется значительное число форматов и типов данных. При отсутствии правил, задающих обязательный состав результатов, предпочтительные форматы и порядок описания метаданных, затрудняется обмен материалами между исследовательскими коллективами и повышается риск дублирования. Одни и те же сведения могут фиксироваться в разных видах документации (например, высотные отметки – в нивелирных планах, ЦМР и/или трехмерной модели), причем выбор определяется опытом исполнителя или доступным программным обеспечением, а не единым регламентом.

Во-вторых, отсутствуют закрепленные требования к качеству цифровых материалов. Близкий по тематике ГОСТ [11] регламентирует инженерно-геодезические работы на объектах культурного наследия в целях реконструкции, но его прямое применение к ОАН проблематично из-за различий задач фиксации, условий полевых работ и состава формируемых данных. Нормативно-технические документы, регулирующие археологические работы [31, 43], не устанавливают однозначных требований к точности и другим количественным характеристикам цифровых материалов. В документе [31] преимущественно фиксируются масштабы выпускаемых материалов, что относится главным образом к их

репродуцированию на бумажном носителе и не характеризует метрические свойства цифровых данных. В настоящее время в работе преимущественно используются цифровые материалы, такие как векторные чертежи и ортофотопланы. Для них характерна мультимасштабность, т.е. возможность использования и визуализации в разных масштабах в зависимости от решаемой задачи без создания отдельного экземпляра для каждого масштаба. Однако, несмотря на возможность изменения масштаба средствами цифровой визуализации, неизменными характеристиками данных материалов остаются степень генерализации чертежей и изображений и точность исходных материалов. Поэтому необходимо сформировать новый подход к оценке качества цифровых данных. Качество цифровых материалов корректнее определять с помощью количественных показателей (точность, уровень детализации/генерализации). В результате требования к качеству фактически остаются неявными, что снижает сопоставимость материалов, полученных разными коллективами, и затрудняет обоснованный выбор оборудования и режимов съемки.

В-третьих, недостаточно регламентированы сами технологические процедуры получения, обработки и оценки точности пространственных данных. Действующие нормативы [31, 43] подробно описывают организацию работ, фиксацию и отчетность, но не задают методических требований к применению современных технологий. Между тем на практике используются геодезические измерения, наземная и воздушная фотограмметрия, лазерное и оптическое сканирование. Для этих подходов отсутствуют требования, определяющие, какие параметры и алгоритмы съемки необходимо использовать для получения качественных данных, как на практике проводить оценку качества исходных данных и получаемой продукции, чтобы результат применения одного из методов был воспроизводимым и сопоставимым.

Перечисленные проблемы имеют общий источник – отсутствие методик, которые связывали бы цель работ с набором итоговых материалов, параметрами их получения, обработки, а также измеримыми критериями качества. Наличие таких методик позволило бы обосновывать выбор оборудования и режимов съемки в

зависимости от задач, стандартизировать процедуры полевого этапа сбора данных (выбор оборудования, создание планово-высотного обоснования, методики выполнения съемки) и камеральной обработки (уравнивание, контроль качества, форматы продукции). В этом случае стандартизация данных, сопоставимость результатов и предсказуемость качества становились бы не следствием индивидуального опыта исполнителя, а результатом единых, документально закрепленных требований.

1.4 Фотограмметрическая модель как основа для документирования объектов археологического наследия

Материалы, получаемые методами фотограмметрии, в современной археологии становятся одной из ключевых основ документирования объектов археологического наследия [15, 17, 60, 96]. Их активное применение связано с тем, что фотограмметрические методы позволяют получать широкий спектр пространственных данных: трехмерные модели, ортофотопланы, ЦМР [1, 60]. Это, в свою очередь, дает возможность фиксировать объект как измеряемую пространственную структуру, сохраняя не только его внешний вид и геометрию, но и взаимное расположение элементов, а также параметры поверхности.

Вместе с тем получение широкого спектра фотограмметрических продуктов при документировании ОАН порождает проблему избыточности и долговременного хранения данных. Полный набор материалов по одному объекту может включать исходные фотоснимки, проект фотограмметрической обработки с результатами фототриангуляции, облако связующих точек, плотное облако точек, ЦМП, ортофотоплан, отдельные ортофотоснимки, трехмерную полигональную модель и текстуры. Для объекта площадью 45 м² такой набор данных может занимать порядка 9,65 ГБ дискового пространства рабочей станции. При этом необходимость хранения и использования всех перечисленных материалов не является одинаковой на разных этапах исследования: на стадии первичной

фиксации, камеральной обработки, анализа, публикации и архивного хранения могут требоваться разные составы данных и разные уровни детализации. В связи с этим возникает задача определения состава фотограмметрических материалов, достаточного для научно достоверного документирования ОАН и одновременно рационального с точки зрения хранения, воспроизводимости и последующего использования.

При этом производные фотограмметрические продукты неравноценны исходным данным по объёму сохраняемой информации. В процессе их формирования часть информации исходных изображений неизбежно утрачивается или представляется в обобщённом виде. Так, чертёж не сохраняет цветовую и текстурную информацию об объекте и отображает его в условной графической форме в соответствии с установленными требованиями к оформлению. Ортофотопланы и ЦМП также представляют собой результаты преобразования исходных данных и отражают только отдельные характеристики объекта. Фотограмметрическая модель, напротив, сохраняет связь с исходными изображениями и позволяет исследователю непосредственно обращаться к визуальной информации об объекте, зафиксированной в момент съёмки.

В настоящем исследовании в качестве основного продукта фотограмметрической обработки для документирования ОАН предлагается рассматривать фотограмметрическую модель, получаемую в результате уравнивания блока фототриангуляции методом связок [51]. Для хранения и последующего использования она представляется в виде уравненного блока цифровых снимков, включающего исходные изображения, параметры внутреннего ориентирования камер, уравненные элементы внешнего ориентирования снимков и координаты связующих точек. Этот набор данных позволяет определять пространственные координаты дополнительных точек объекта пересечением соответственных проектирующих лучей. Схема получения фотограмметрической модели представлена на рисунке 1 (где $O_{\text{м}},\ X_{\text{м}},\ Y_{\text{м}}, Z_{\text{м}}$– система координат модели, S – центр проекции).

В современной научной и производственной практике фотограмметрическая модель сравнительно редко рассматривается как самостоятельный продукт обработки.

Вместе с тем АО «Урало-Сибирская Гео-Информационная Компания» [5] активно внедряет единые 3D-стереомодели территорий [2], которые можно рассматривать как одну из форм стереоскопического представления фотограмметрической модели. Такой вывод следует из положений ГОСТ Р 58854-2020 [12] и руководства пользователя ЦСФС «ИНСОТ» [47], описывающих состав данных для формирования единой стереомодели территории.

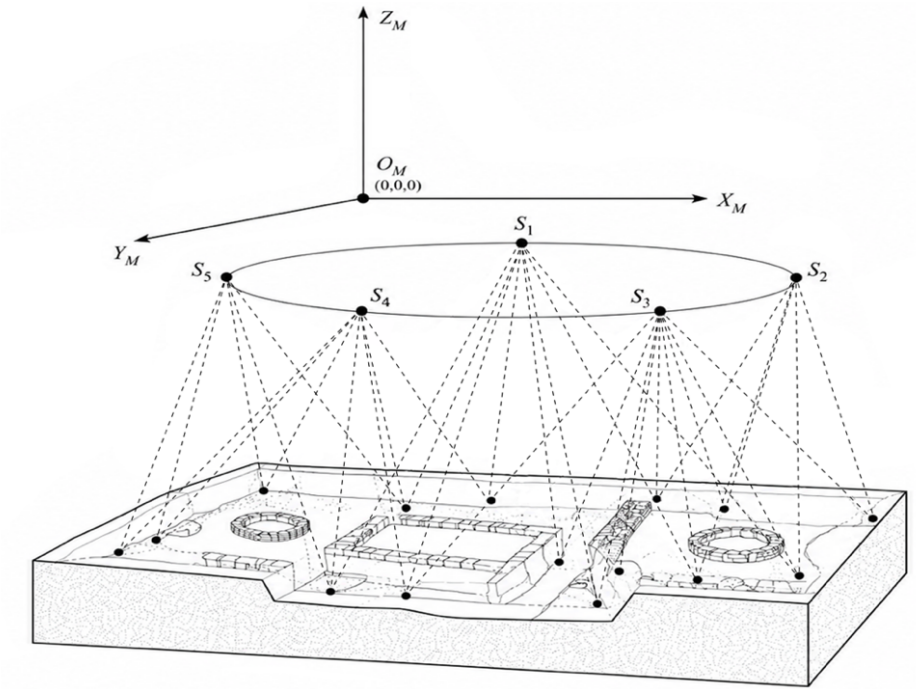


Рисунок 1 – Схема получения фотограмметрической модели ОАН

При применении на практике фотограмметрические модели объекта обладают следующими преимуществами.

Фотограмметрическая модель объекта требует существенно меньшего объема дискового пространства по сравнению с полным набором производных фотограмметрических продуктов. Так, для вышерассмотренного проекта объем данных, составляющих фотограмметрическую модель, – 4,8 ГБ, что примерно на 50 % меньше объема полного набора производных материалов.

На основе фотограмметрических моделей можно получать производные фотограмметрические продукты, используемые в научной отчетности и публикациях: ортофотопланы, трехмерные модели, ЦМР/ЦМП [14, 87].

Фотограмметрические модели могут быть экспортированы из одной ЦФС и импортированы в программное обеспечение другого производителя при условии поддержки соответствующих обменных форматов [84]. В частности, фотограмметрическая модель, сформированная в ЦФС Agisoft Metashape Professional, может быть передана для дальнейшей обработки или использования в RealityScan [66], PHOTOMOD [49] и другие ЦФС при наличии совместимых форматов экспорта и импорта.

Точность производных продуктов в значительной степени определяется точностью исходной фотограмметрической модели, полученной в результате уравнивания блока снимков [30, 33]. Использование единой уравненной модели в качестве исходной позволяет снизить вероятность внесения дополнительных ошибок на последующих этапах обработки.

Фотограмметрическая модель может рассматриваться не только как основа для последующего получения производных фотограмметрических продуктов, но и как самостоятельный цифровой продукт. Такая модель обеспечивает возможность выполнения измерений, определения координат и высот точек, векторизации, а также детального изучения объекта в специализированных цифровых фотограмметрических системах, в том числе в ЦСФС «ИНСОТ».

Вместе с тем ввиду использования фотограмметрических моделей в качестве стандарта документирования ОАН необходима разработка воспроизводимой методики их создания и оценки. Такая методика должна включать требования к условиям и параметрам фотограмметрической съемки, алгоритмам обработки снимков, контролю качества и точности получаемой модели, а также к структуре хранения исходных данных и результатов фотограмметрической обработки. В этом контексте принципиальное значение имеет сохранение полного набора данных фотограмметрической модели и сопутствующих метаданных, что обеспечивает возможность её последующего воспроизведения и уточнения по мере развития программного обеспечения и методик обработки [23].

Таким образом, фотограмметрическая модель выступает не только средством сохранения, но и формой пространственной фиксации объекта, на основе которой

выполняются измерения и создаются производные материалы. В связи с этим особую значимость приобретает вопрос научной достоверности фотограмметрической модели, что обусловливает необходимость определения требований к ее качеству и точности как результату документирования ОАН.

1.5 Обоснование требований к фотограмметрической модели объекта археологического наследия

В современных цифровых фотограмметрических системах, таких как ЦФС Agisoft Metashape Professional, RealityScan и др., уравнивание блока фототриангуляции и, как следствие, формирование фотограмметрической модели объекта являются одним из первичных этапов фотограмметрической обработки. Большинство современных ЦФС используют уравнивание по методу связок, поскольку данный метод позволяет выполнять совместную оптимизацию параметров внутреннего и внешнего ориентирования снимков и координат точек объекта в единой математической модели, основанной на уравнениях коллинеарности [51]. В результате формируется уравненный фотограмметрический блок, являющийся основой для построения плотного облака точек, ЦМР/ЦМП, ортофотоплана и трехмерной модели объекта.

По результатам уравнивания блока фототриангуляции могут быть получены три вида фотограмметрических моделей: свободная фотограмметрическая модель, в которой координаты точек объекта определяются в локальной системе координат с неопределённым масштабом; масштабированная фотограмметрическая модель, масштаб которой определяется по известному базису фотографирования или контрольному линейному размеру; ориентированная фотограмметрическая модель, в которой координаты точек определены в системе координат объекта съёмки.

Тип модели определяется исходными данными, используемыми при уравнивании блока фототриангуляции. При отсутствии элементов внешнего ориентирования и данных о масштабе получают свободную фотограмметрическую

модель [49]. Известный базис фотографирования или контрольный линейный размер позволяет получить масштабированную модель. При наличии элементов внешнего ориентирования снимков или координат опорных точек получают ориентированную фотограмметрическую модель [10].

На практике принято оценивать точность результата уравнивания блока фототриангуляции путем вычисления расхождений между координатами опорных и контрольных точек [6, 80], полученными по результатам уравнивания, и их исходными геодезическими координатами. При этом невязки на опорных точках характеризуют степень согласования фотограмметрического блока с геодезической основой, тогда как расхождения на контрольных точках, не участвовавших в уравнивании, позволяют получить независимую оценку точности сформированной фотограмметрической модели. Оценка, как правило, выполняется по координатным составляющим X, Y, Z, с вычислением средних, максимальных и средних квадратических погрешностей. Полученные значения используются для проверки соответствия уравненного блока заданным требованиям к точности и для обоснования возможности последующего получения производных фотограмметрических продуктов.

Кроме того, на точность уравнивания блока фототриангуляции и возможность выполнения точных измерений по фотограмметрической модели объекта оказывает влияние качество исходных изображений [103]. Недостаточная резкость, смаз, высокий уровень шума, неравномерная освещенность, потеря информации на засвеченных участках и тенях, а также низкая контрастность снижают надежность автоматического выделения и отождествления связующих точек, что может приводить к ухудшению точности ориентирования снимков и снижению геометрической точности получаемой фотограмметрической модели [4]. Наряду с этим изобразительное качество снимков определяет дешифрируемость и измеримость элементов объекта: границ археологических структур, микрорельефа, следов сооружений, культурного слоя и иных признаков, подлежащих фиксации. При недостаточной различимости таких элементов возрастает неопределенность их визуального выделения и последующего

измерения по фотограмметрической модели, даже при формально удовлетворительных показателях уравнивания блока.

Исходя из изложенного, для оценки качества фотограмметрических материалов предлагается использовать два показателя: геометрическую точность измерений по фотограмметрической модели и пространственное разрешение исходных изображений.

Геометрическая точность – степень соответствия расстояний между точками, измеренных по фотограмметрической модели, их действительным или принятым за действительные значениям.

Пространственное разрешение исходных изображений, используемых для получения фотограмметрической модели, – линейная характеристика цифрового изображения, выражающая размер проекции одного пикселя матрицы на поверхность объекта съемки и определяющая шаг пространственной дискретизации изображения на объекте съемки [37].

В совокупности рассматриваемые показатели формируют основу для оценки качества фотограмметрических материалов, используемых при документировании, анализе и визуализации ОАН. Поэтому для каждого параметра необходимо определить количественные характеристики всех критериев для того, чтобы в дальнейшем была возможность объективно оценить качество фотограмметрической модели.

В действующих нормативно-технических актах и руководствах, регламентирующих выполнение археологических, фотограмметрических, топографических и геодезических работ [11, 18, 31, 54], требования к создаваемым продуктам традиционно формулируются в зависимости от используемого масштаба. Поэтому в первую очередь необходимо определить, какие масштабы чертежей в настоящее время используются в процессе археологических работ. Для этого воспользуемся основными нормативно-техническими документами, регламентирующими порядок проведения археологических работ и содержащими требования к отчетной документации [31, 54].

Из Основных положений о порядке проведения археологических полевых работ и составления научной отчетной документации [31] следует, что при

проведении раскопок наиболее распространены масштабы составления чертежей от 1:10 до 1:50 в зависимости от типа объекта и принадлежности к определенному историческому периоду, но в частных случаях могут требоваться масштабы крупнее, вплоть до 1:1. Однако данное Положение устанавливает только масштаб чертежа, т.е. степень уменьшения размеров объекта при его изображении на бумаге. При этом оно не определяет допустимые погрешности положения и размеров отображаемых элементов, а также степень их упрощения. Качество современных цифровых чертежей предпочтительно характеризовать точностью определения координат точек местности или взаимным положением точек на плане ближайших контуров, а также генерализацией, что позволяет получать при печати чертежи более крупного или мелкого масштаба, поэтому необходимо установить базовый масштаб чертежа. Так как фотограмметрическая модель будет основой для составления документации на ОАН, то ее точность в дальнейшем должна обеспечивать возможность создавать чертежи в соответствии с требованиями нормативных документов, регламентирующих процесс археологических исследований. Наиболее подробно вопрос точности и масштаба чертежей рассмотрен в отдельных руководствах [19, 54]. На их основе были сформулированы обобщенные требования к точности контрольных промеров (S) в зависимости от типа объекта и масштаба (таблица 2).

Таблица 2 – Требования к точности контрольных промеров ОАН

№	**Уровень**	**Описание**	**Масштаб**	**СКП S ($0,3$ мм $\cdot$ **M**)**
1	A (деталь)	Мелкие объекты, профиль слоя, мелкие находки	1:10–1:20	3–6 мм
2	B (элемент)	Отдельные конструкции, стены, очертания сложных ям	1:25–1:50	7,5–15 мм
3	C (раскоп/квадрат)	Целый шурф/квадрат, синхронизация квадратов	1:50	15 мм
4	D (участок)	Обзор участка/памятника, контекст	1:200–1:500	60–150 мм

Исходя из данных, приведенных в таблице 2, требования к геометрической точности фотограмметрических моделей ОАН целесообразно устанавливать с учетом масштаба последующего представления и измерительного использования

модели. Поскольку в настоящей работе рассматривается документирование ОАН на уровне археологического раскопа, в качестве базового принимается масштаб 1:50. При таком масштабе допустимая погрешность взаимного положения точек ближайших контуров составляет 15 мм на объекте. В связи с этим значение 15 мм принимается в качестве критерия геометрической точности фотограмметрической модели, предназначенной для документирования ОАН на уровне раскопа.

Далее необходимо обосновать требования к пространственному разрешению изображений, поскольку данный критерий определяет возможность раздельного воспроизведения, дешифрирования и измерения минимально значимых элементов ОАН. В связи с этим на первом этапе следует установить минимальный размер элементов объекта, которые должны быть надежно определены по снимкам и впоследствии отображены на чертеже заданного масштаба.

Нормативно-технические акты [11, 31] не содержат специальных требований к генерализации объектов при выполнении чертежей ОАН. В связи с этим для обоснования требований к минимальному размеру отображаемых элементов представляется допустимым использовать положения технических условий проведения метрических обследований объектов культурного наследия [54], согласно которым на чертежах подлежат отображению объекты, размеры которых составляют 0,2 мм в масштабе плана и более. Для масштаба 1:50 указанное значение соответствует 10 мм на объекте.

Ключевой характеристикой цифровых изображений является пространственное разрешение, которое отражает шаг пространственной дискретизации изображения, что, в свою очередь, определяет минимальные размеры элементов, которые могут быть надежно различимы на снимке. Именно пространственное разрешение непосредственно влияет на возможность обнаружения, определения и идентификации элементов ОАН и, следовательно, на информативность получаемых материалов [81, 83]. При этом действующая нормативная документация, как правило, не устанавливает требований к пространственному разрешению изображений с позиций дешифрируемости (т.е. способности уверенно выявлять и распознавать объекты и их детали) [3].

Одним из распространённых подходов к оценке дешифрируемости объектов являются критерии Джонсона [75] (таблица 3), которые применяются при обосновании требований к пространственному разрешению изображений, в том числе в исследованиях в области аэрофотосъёмки [45]. Они устанавливают связь между уровнем интерпретации объекта и числом разрешаемых пар линий, приходящихся на его критический размер. Поскольку одна пара линий соответствует двум элементам дискретизации изображения, критерии могут быть представлены в пиксельной форме.

Таблица 3 – Критерии Джонсона

№	Параметр	Критерий (пары линий)	Критерий (пикс.)
1	Обнаружение	1,0 +/− 0,25	1–2
2	Ориентация	1,4 +/– 0,35	3–4
3	Распознавание	4 +/– 0,8	6–8
4	Идентификация	6,4 +/– 1,5	10–12

Схожие требования предлагаются авторами учебника «Аэрокосмические методы географических исследований» [20]. Сводные результаты сравнения критериев приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Критерии дешифрируемости объектов на изображении

№	Параметр	Размер объекта, пикс.
1	Простое обнаружение	2 × 2
2	Надежное определение	4 × 4
3	Классификация формы	10 × 10

Таким образом, для идентификации элемента ОАН размером 10 мм и классификации его формы изображение данного элемента должно содержать не менее 10 пикселей. Это определяет требуемое пространственное разрешение съёмки на уровне не хуже 1 мм/пикс.

По результатам анализа нормативной документации сформулированы требования к геометрической точности фотограмметрической модели и пространственному разрешению исходных изображений. Обобщённые требования к

геометрической точности фотограмметрической модели и пространственному разрешению исходных изображений приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Требования к фотограмметрической модели и исходным изображениям ОАН

№	Критерий	Характеристика	Значение	Единицы измерения
1	Геометрическая точность фотограмметрической модели	Контрольные промеры	15	мм
2	Пространственное разрешение исходных изображений	Размер пикселя на местности	1	мм/пикс.

Выводы по разделу 1

1. Установлено, что цифровизация археологической практики носит системный характер: современные методы фиксации и документирования, а также цифровая обработка материалов всё чаще используются не только как исследовательский инструмент, но и как часть подготовки обязательной отчетной документации по ОАН. Применение цифровых технологий обеспечивает повышение точности фиксации, полноты представления данных и оперативности их получения, что особенно важно в условиях необратимости разрушения контекста в ходе раскопок.

2. Наземная фотограмметрическая съемка относится к числу наиболее эффективных и технологически доступных методов пространственной фиксации археологических объектов. Ее широкая применимость обусловлена сочетанием сравнительной простоты, высокой детальности и фотореалистичности получаемых данных, а также возможностью получения результатов, достаточных для последующего анализа и формирования производных материалов.

3. Дальнейшее внедрение цифровых технологий в документирование ОАН сдерживается недостаточностью методических и организационно-технических решений. Отсутствие единых требований к процедурам съемки и контролю качества, форматам представления и долгосрочного хранения данных, а

также к регламентам обработки снижает сопоставимость и воспроизводимость результатов. Следовательно, требуется развитие методической базы и элементов стандартизации, включая требования к оборудованию, методикам съемки и процедурам контроля качества.

4. Фотограмметрическая модель объекта археологического наследия выполняет роль не только этапа фотограмметрической обработки, но и самостоятельного цифрового продукта, являющегося носителем первичных пространственных данных, способного выступать основой для документирования ОАН, а также обеспечивающего возможность повторного анализа без доступа к объекту.

5. Сформулированы требования к качеству фотограмметрической модели ОАН, обеспечивающие возможность ее применения в области археологических исследований. Определены параметры геометрической точности, а также требования к дешифрируемости изображений, рассматриваемые как критически важные характеристики для обеспечения научной достоверности модели, выполнения измерений, подготовки графических материалов и последующей визуализации. Установленные требования задают основу для разработки методики получения исходных данных и процедур контроля качества процесса документирования.

РАЗДЕЛ 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СЪЕМКИ ДЛЯ ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ

В предыдущем разделе показано, что документирование объектов археологического наследия наиболее рационально выполнять фотограмметрическим методом. Вместе с тем, несмотря на накопленный практический опыт и широкое распространение фотограмметрии в археологической документации, в настоящее время сохраняется методический разрыв: отсутствуют унифицированные требования к процессу получения исходных данных, фотограмметрической обработки, а также оценки качества получаемых документов. Данное обстоятельство сдерживает развитие и внедрение фотограмметрических методов документирования ОАН, а также использование фотограмметрической модели как стандарта цифрового документа в области археологии.

Отдельно следует подчеркнуть, что качество итоговой фотограмметрической модели определяется качеством исходных изображений и полнотой сведений об условиях съемки и данных о привязке. Для использования такой модели в научных исследованиях необходимо обеспечить возможность ее повторного построения независимыми учеными с получением сопоставимых результатов измерений.

В последние годы в фотограмметрии наблюдается тенденция к использованию многокамерных систем с фиксированным базисом, что позволяет получать фотограмметрические модели с заданным масштабом, поскольку масштаб блока фототриангуляции может быть задан известной длиной жестко фиксированного базиса фотографирования (при условии корректной калибровки системы) [21, 62, 102]. Одними из примеров подобных решений являются итальянская двухкамерная система CRAB (рисунок 2), разработанная для фотограмметрической съёмки подводных объектов археологического наследия [98], а также стационарная двухкамерная фотограмметрическая система с

фиксированным базисом, применяемая для мониторинга оползневых процессов [93].



Рисунок 2 – Стереосистема для подводной съемки CRAB

Следует отметить, что в фотограмметрической практике наблюдается устойчивая тенденция к расширению методов съемки за счет использования видеозаписей [88, 99], что обусловлено развитием технологий видеосъемки и ростом качества видеоданных [100]. К основным преимуществам видеосъемки можно отнести снижение риска неполного охвата объекта и недостаточного перекрытия (в том числе при ограниченном опыте оператора), повышение вероятности получения кадров без временных закрытий отдельных элементов сцены (мертвых зон), а также возможность извлечения изображений с высокой частотой и, как следствие, обеспечения большего перекрытия между соседними кадрами, что обычно положительно влияет на устойчивость и полноту обработки методами SfM [63].

На основании изложенного в настоящем исследовании при разработке методики съемки для документирования объектов археологического наследия принимается подход, основанный на использовании калиброванной двухкамерной стереосистемы с фиксированным базисом, осуществляющей синхронную видеосъемку.

2.1 Разработка опытного образца стереосистемы с фиксированным базисом для документирования объектов археологического наследия

Разрабатываемая стереосистема предназначена для одновременной видеосъемки двумя камерами при документировании объектов археологического наследия.

При ее проектировании приоритетом являются мобильность и удобство полевого применения, достигаемые благодаря малой массе и габаритам (для удобства длительной съемки и перемещения по объекту), быстрое развертывание, устойчивость к внешним воздействиям. Важным требованием остаются доступность комплектующих и простота сборки, чтобы исследовательские группы могли самостоятельно изготовить и обслуживать систему.

2.1.1 Обоснование выбора цифровой камеры для фотограмметрической видеосъемки

Основным элементом конструкции опытного образца фотограмметрической стереосистемы являются цифровые камеры, поскольку именно их характеристики в наибольшей степени определяют качество исходных видеоданных и, как следствие, пригодность материалов для последующей фотограмметрической обработки. Выбор камер должен быть обоснован совокупностью параметров: качеством видеозаписи, компактностью и технологической пригодностью для использования в составе стереосистемы, а также доступностью оборудования с точки зрения стоимости и распространенности. Дополнительным преимуществом является возможность одновременной регистрации телеметрических данных, включая координаты GNSS/GPS и параметры траектории перемещения системы, что позволяет в первом приближении оценивать расположение центров фотографирования в абсолютной системе координат и использовать эти сведения как вспомогательную информацию на этапе внешнего ориентирования модели.

Для стереосистемы фотограмметрической видеосъемки наиболее рационально использовать экшн-камеры, поскольку они конструктивно ориентированы на длительную видеозапись в полевых условиях и отличаются компактностью, ударо- и влагозащитой, а также большим набором креплений, что упрощает их монтаж в составе стереосистемы. При выборе камер ключевыми являются характеристики видеопотока (разрешение и частота кадров, цветовая разрядность и кодек, битрейт), а также стабильность геометрии изображения и возможность получения/экспорта сопутствующих данных (телеметрии), которые могут использоваться как вспомогательная информация при последующей обработке и контроле.

Современный рынок экшн-камер представлен прежде всего линейками камер GoPro HERO, DJI Osmo Action и Insta360 (а также более бюджетными брендами). При этом по качеству видеозаписи (разрешение/частота кадров, наличие 10-битного цифрового преобразователя, современные кодеки) флагманские модели указанных линеек в целом находятся на сопоставимом уровне, различаясь деталями режимов и профилей записи. В части телеметрии существует принципиальная разница: у ряда моделей-конкурентов запись GPS-данных чаще реализуется через внешние устройства. Так, для Osmo Action предлагается отдельный пульт Osmo Action GPS Bluetooth Remote Controller, который записывает данные встроенной GPS и затем интегрирует их в видеозапись через приложение DJI Mimo. В экосистеме Insta360 добавление GPS-данных обычно выполняется через внешние источники (смартфон, Apple Watch / Garmin) либо через GPS Preview Remote, а сами данные затем синхронизируются и используются при экспорте. В линейке камер GoPro производители также отказались от интеграции GPS в камеру, начиная с модели камеры GoPro HERO12. Фактически камера GoPro HERO11 стала последней моделью со встроенной GPS.

На основании проведенного сравнения выбор камеры GoPro HERO11 Black представляется обоснованным как с технической, так и с экономической точки зрения. По основным параметрам видеозаписи данная модель обеспечивает характеристики, достаточные для решения поставленных задач и сопоставимые с

характеристиками более новых экшн-камер того же класса. В частности, камера GoPro HERO11 Black поддерживает видеозапись с разрешением 5,3K и частотой 60 кадр/с, а также регистрацию телеметрических данных, включая данные GPS, непосредственно в процессе съемки.

Для выполнения последующих фотограмметрических расчетов были рассмотрены параметры светочувствительной матрицы выбранной камеры. Камера GoPro HERO11 Black оснащена матрицей оптического формата 1/1,9 дюймов с отношением сторон 8:7. При этом производитель не приводит физические размеры ее активной светочувствительной области и размер единичного светочувствительного элемента. Согласно технической документации сенсора Sony IMX677-AAPH5-J, характеристики которого соответствуют опубликованным параметрам матрицы камеры GoPro HERO11 Black, размер матрицы составляет 6,74 × 5,05 мм, а размер пикселя – 1,056 мкм. Поскольку модель установленного сенсора официально не раскрывается производителем камеры, указанные значения были приняты в качестве технически обоснованной оценки. Подробные технические характеристики камеры приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики экшн-камеры GoPro HERO11 Black

№	Характеристика	Значение
1	Размер матрицы	6,74 × 5,05 мм
2	Фокусное расстояние	2,71 мм
3	Физический размер пикселя	1,056 мкм
4	Угол поля зрения	l_x/l_y = 102°/70°
5	Разрешение изображения	5568 × 4872 пикс.

2.1.2 Расчет параметров стереосистемы

В основе концепции стереосистемы лежит принцип работы стереофототеодолита. В классической стереофототеодолитной схеме стереопара формируется из двух снимков, полученных из двух центров проекций S_1 и S_2, соединенных базисом фотографирования B = $|S_1S_2|$. Схема нормального случая съемки с применением фототеодолита приведена на рисунке 3. Там же

представлены две системы координат: система координат объекта (O_0, X_0, Y_0, Z_0) и система координат модели $(S_1, X_ф, Y_ф, Z_ф)$, называемая в инструкции [34] фотограмметрической системой координат, в которой известна величина базиса на местности.

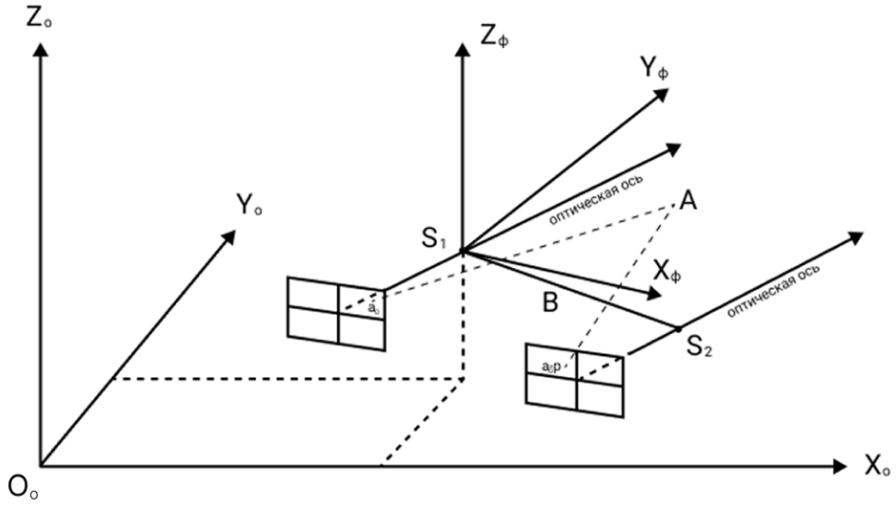


Рисунок 3 – Фототеодолитная съемка. Нормальный случай

Из инструкции [34] очевидно, что для проведения измерений координат в фотограмметрической системе координат (масштабный коэффициент которой соответствует системе координат объекта, что позволяет корректно определять размеры) достаточно знать базис фотографирования. Вычисление координат выполняется по формулам 1–3:

$$X_ф = \frac{B \cdot x_1}{p} \quad (1)$$

$$Y_ф = \frac{B \cdot f}{p} \quad (2)$$

$$Z_ф = \frac{B \cdot z_1}{p}, \quad (3)$$

где $X_ф Y_ф Z_ф$ – система координат фотограмметрической модели;

B – базис фотографирования на местности;

x_1, z_1 – координаты определяемой точки на левом снимке;

p – продольный параллакс определяемой точки ($p = x_1 - x_2$).

Аналогично принципу выполнения стереофототеодолитной съемки в разрабатываемой стереосистеме роль центров проекций выполняют оптические центры камер (передняя узловая точка объектива камеры), а известное расстояние между ними задает базис фотографирования *B*, фиксированный конструктивно. Поэтому для стереосистемы необходимо предварительно вычислить минимальный базис фотографирования.

При полевой съемке, когда оператор держит стереосистему в руках и перемещается вдоль объекта, реализуется нормальный случай съемки: главные оптические оси камер параллельны, а также перпендикулярны (нормальны) относительно базиса фотографирования [39]. Такая геометрия предсказуема и дает стабильный параллакс, что позволяет опираться на классические зависимости при вычислении минимально допустимого базиса фотографирования.

На первом этапе необходимо определить рабочий диапазон стереосистемы. Исходя из требований к пространственному разрешению изображений (таблица 5), при фотограмметрической съемке ОАН необходимо выполнять съемку с пространственным разрешением 1 мм и лучше.

Первоначально были определены такие параметры камеры, как фокусное расстояние и эффективный размер пикселя при формировании видеопотока. Если с фокусным расстоянием особых сложностей не возникает, так как оно соответствует физическому фокусному расстоянию, которое можно извлечь из метаданных изображений, получаемых при обычном фотографировании, то определение эффективного размера пикселя выходного видеокадра связано с рядом трудностей, поскольку разрешение видеозаписи может быть ниже разрешения фотоснимков, формируемых той же камерой. Это обусловлено необходимостью обеспечить требуемую частоту считывания данных с матрицы, их последующей обработки и кодирования. Так, камера GoPro HERO11 Black позволяет выполнять видеосъемку с частотой 60 кадр/с при разрешении до 5,3K (5312 × 2988 пикс.), тогда как при частоте 120 кадр/с максимальное разрешение ограничено форматом 4K (3840 × 2160 пикс.). Снижение выходного разрешения при увеличении частоты кадров связано с ограничениями производительности

матрицы, процессора обработки изображений и процесса кодирования видеозаписи. Формирование видеокадров требуемого разрешения может осуществляться посредством ограничения считываемой области матрицы, объединения соседних пикселей (биннинга), пространственной субдискретизации, а также последующего программного масштабирования изображения. Поскольку производитель не раскрывает технических особенностей режимов считывания матрицы и алгоритмов формирования видеопотока, однозначно установить применяемый способ преобразования исходных данных для каждого режима видеосъемки не представляется возможным.

В связи с отсутствием открытых данных о точном алгоритме считывания матрицы и формирования видеокадра эффективный размер пикселя определялся расчетным способом. В рамках расчета принято допущение, что при видеосъемке используется полная длина горизонтальной стороны матрицы, тогда как размер используемой области по вертикали ограничивается в соответствии с соотношением сторон выходного видеокадра. Данное соотношение определялось исходя из разрешения полученной видеозаписи. На основании принятой геометрической модели эффективные размеры пикселя выходного изображения по горизонтальному и вертикальному направлениям были вычислены по формулам 4–6:

а) размер пикселя по длинной стороне матрицы:

$$pxl_x = \frac{l_{x(pix)}}{l_x}, \tag{4}$$

где l_x −размер матрицы по длинной стороне матрицы (мм);

$l_{x(pix)}$ −количество пикселей по длинной стороне матрицы;

б) эффективный размер матрицы по короткой стороне:

$$l_{y-used} = l_x \cdot \frac{1}{I_{ratio}}, \tag{5}$$

где l_x −размер матрицы по длинной стороне матрицы (мм);

I_{ratio} − отношение сторон матрицы;

в) размер пикселя по короткой стороне матрицы (контроль):

$$pxl_y = \frac{l_{y-used}}{l_y}, \quad (6)$$

где l_{y-used} −эффективный размер матрицы по короткой стороне(мм);

l_y −количество пикселей по короткой стороне матрицы;

В результате расчетов определены эффективные размеры пикселя камеры GoPro HERO11 Black для режима съемки с разрешением 5,3K (5312 × 2988 пикс.) и частотой 60 кадров/с, а также для режима съемки с разрешением 4K (3840 × 2160 пикс.) и частотой 120 кадр/с. Полученные значения представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Расчетный эффективный размер пикселя камеры GoPro HERO11 Black

№	Частота кадров, FPS	Разрешение, пикс.	I_{ratio}	p_x[мкм]	p_y[мкм]
1	60	5312 × 2988	16:9	1,268	1,268
2	120	3840 × 2160		1,755	1,755

Для проверки расчетного значения эффективного размера пикселя матрицы камеры проведено его экспериментальное определение по известным расстоянию до объекта и пространственному разрешению изображения. Эффективный размер пикселя вычислялся по формуле 7:

$$pxl = \frac{f \cdot GSD}{D}, \quad (7)$$

где f – фокусное расстояние (мм);

D – отстояние от плоскости тест-объекта (мм);

GSD – пространственное разрешение на местности (мм/пикс).

Ключевой проблемой при прямом измерении расстояния D является отсутствие сведений о точном положении задней узловой точки оптической системы, до которой и следует измерять расстояние. В связи с этим дистанция до плоскости тест-объекта определялась по результатам решения обратной фотограмметрической засечки: на плоский тест-объект были нанесены высококонтрастные кодированные маркеры, обеспечивающие автоматическое и

однозначное распознавание опорных точек, координаты которых известны в системе координат тест-объекта.

Съемка выполнялась по конвергентной схеме, представленной на рисунке 4. Отдельное внимание было уделено выбору режима цифрового объектива. Камера GoPro HERO11 Black поддерживает несколько режимов формирования изображения, включая широкоугольный и линейный. Производитель обозначает данные режимы как цифровые объективы [71]. В режиме Linear выполняется программная коррекция дисторсии, реализованная производителем, в результате чего геометрия изображения приближается к модели центральной проекции. В связи с этим все последующие эксперименты проводились с использованием режима Linear, поскольку для решения фотограмметрических задач предпочтительно применять изображения, геометрические характеристики которых наиболее близки к модели пинхол-камеры [89, 97].

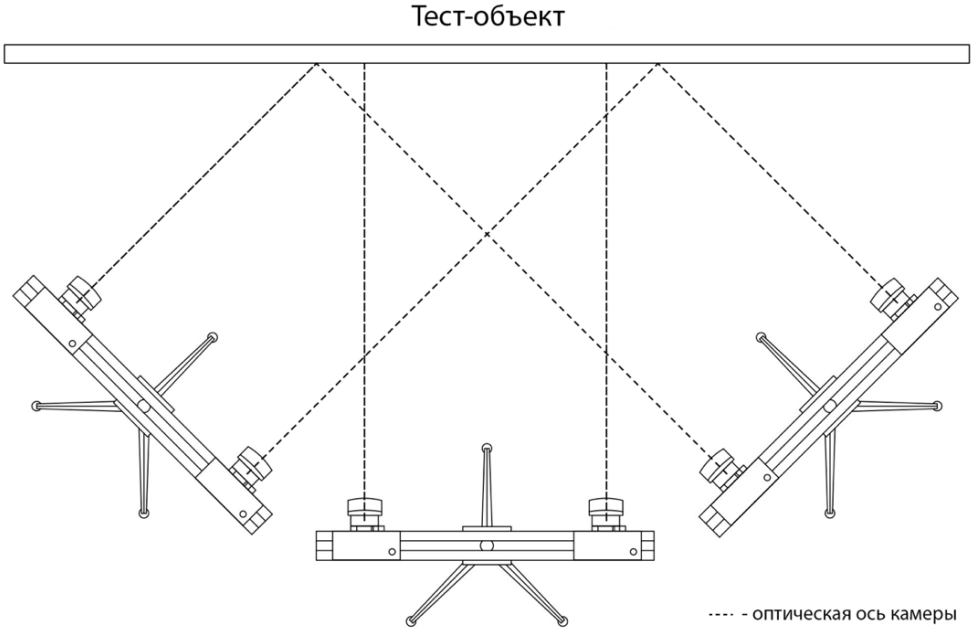


Рисунок 4 – Схема фотографирования тест-объекта (вид сверху)

После съемки из видеоматериала были извлечены отдельные кадры и выполнена их фотограмметрическая обработка. На основе опорных точек, нанесенных на плоский тест-объект и имеющих известные координаты в его собственной системе, для каждого кадра были определены элементы внешнего

ориентирования. Далее, с помощью координат опорных точек и положения задней узловой точки (соответствует координатам центра фотографирования), полученных в результате решения обратной фотограмметрической засечки, было вычислено расстояние от камеры до плоскости тест-объекта. Затем на тест-объекте был выбран эталонный отрезок между двумя маркерами: его длина была определена в системе координат тест-объекта, а на изображениях были измерены соответствующие отрезки в системе координат снимка. По соотношению длины отрезка в системе координат тест-объекта и длины отрезка в системе координат снимка было вычислено пространственное разрешение. После определения недостающих величин по формуле 7 был установлен эффективный размер пикселя матрицы при выполнении видеосъемки. Результаты расчетов приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Расчетный эффективный размер пикселя

№	**Частота кадров, FPS**	**Разрешение, пикс.**	$\boldsymbol{D}$, [м]	$\boldsymbol{p_x, p_y}$[мкм]
1	60	5312 × 2988	0,8351	1,056
2	120	3840 × 2160		1,461

Сопоставление расчетных и экспериментально определенных значений эффективного размера пикселя показало, что для камеры GoPro HERO11 Black в режиме 5,3K экспериментальное значение составляет 1,056 мкм, тогда как расчетное значение, полученное при условии использования всей ширины активной области матрицы, равно 1,268 мкм. Разность составляет 0,212 мкм, или 16,7 %. При этом экспериментально установленное значение соответствует физическому размеру светочувствительного элемента матрицы. Это позволяет предположить, что при формировании видеокадра в режиме 5,3K исходное изображение не масштабируется, однако используется не вся ширина активной области матрицы. Вероятно, периферийные участки изображения исключаются при кадрировании и программной коррекции радиальной дисторсии в режиме Linear.

Для режима 4K экспериментально определенный эффективный размер пикселя составил 1,461 мкм, а расчетное значение при условии использования

всей ширины матрицы – 1,755 мкм. Расхождение равно 0,294 мкм, или 16,8 %. В данном режиме уменьшение разрешения видеокадра при практически неизменном угле поля зрения указывает на дополнительное преобразование исходных данных матрицы. Оно может выполняться посредством объединения соседних пикселей, пространственной субдискретизации, пропуска строк или последующего программного масштабирования изображения. Одновременно, как и в режиме 5,3K, возможно кадрирование периферийных областей с наиболее выраженной дисторсией.

Таким образом, теоретические значения, рассчитанные исходя из полного использования активной области матрицы, не учитывают фактический размер области считывания, степень кадрирования и алгоритм формирования видеокадров. Поскольку точные параметры данных преобразований производителем не раскрываются, в последующих расчетах использованы эффективные размеры пикселя, определенные экспериментальным путем.

Исходя из определенных характеристик выбранной цифровой камеры, было рассчитано предельное расстояние (D), при котором пространственное разрешение изображения не превышает 1 мм/пикс. Расчет выполнен по формуле 8 с использованием экспериментально определенных эффективных размеров пикселя. Для режима видеосъемки 5,3K максимально допустимое расстояние составило $D_{5,3K} = 2{,}5$ м, а для режима 4K – $D_{4K} = 2{,}0$ м.

$$D = \frac{GSD \cdot f}{pxl}, \tag{8}$$

где $GSD -$ пространственное разрешение (мм/пикс);

$f -$ фокусное расстояние (мм);

$pxl -$ эффективный размер пикселя матрицы (мм).

После установления максимально допустимого расстояния до объекта съемки D рассчитаем величину базиса фотографирования, позволяющего обеспечить необходимую точность для камеры GoPro Hero11 Black. Для вычисления минимально необходимого базиса будет использоваться формула 9, определяющая точность измерений по стереопаре снимков по глубине [38]:

$$m_z = \frac{D \cdot m_p}{b}, \tag{9}$$

где D – отстояние от объекта съемки (мм);

m_p – ошибка измерения координат точки на снимке (мм);

b – базис фотографирвоания в масштабе снимка (мм).

Формула 9 позволяет выразить базис фотографирования в системе координат снимка. Для определения базиса фотографирования на местности необходимо его выразить из формулы 10:

$$b = B \cdot \frac{f}{D}, \tag{10}$$

где B – базис фотографирования на местности (мм);

f – фокусное расстояние (мм);

D – отстояние от объекта (мм).

В результате базис фотографирования стереосистемы на местности будет выражен по формуле 11:

$$B_{cc} = \frac{D^2 \cdot m_p}{m_z \cdot f}, \tag{11}$$

где D – отстояние от объекта (мм);

$m_p = 0{,}5 \cdot pxl$ – ошибка измерения координат точки на снимке (мм);

$m_z = 15$ мм – допустимая ошибка определения глубины;

f – фокусное расстояние (мм).

Из расчетов следует, что для обеспечения точности определения глубины по стереопаре не хуже 15 мм при съемке в режиме 5,3K с расстояния $D_{5,3K} = 2{,}5$ м минимальный базис должен составлять не менее 85 мм. Для режима 4K при расстоянии $D_{4K} = 2$ м минимально допустимый базис составляет 62 мм.

Впрочем, применение стереосистемы не ограничивается максимальным расстоянием фотографирования, определенным относительно пространственного разрешения. Съемка отдельных элементов ОАН может выполняться ближе в связи с труднодоступностью объекта. Поэтому максимальная дистанция для съемки ограничена характеристиками камеры и возможностью обеспечивать необходимое

пространственное разрешение съемки, которое улучшает сокращение расстояния фотографирования. В случае использования стереосистемы минимальная дистанция до объекта съемки ограничена только минимальной дистанцией фокусировки камеры, которая для камеры GoPro HERO11 составляет порядка 30 см [59]. Минимальная дистанция фокусировки является физическим пределом, однако в условиях полевой съемки контроль расстояния затруднен, поэтому в качестве минимальной рабочей дистанции принята величина $D_{min} = 0{,}5$ м. В результате получаем диапазон эффективных расстояний фотографирования для выполнения съемки с применением стереосистемы от $D_{min} = 0{,}5$ м до $D_{max} = 2{,}5$ м при съемке в режиме 5,3K и до $D_{max} = 2$ м при съемке в режиме 4K.

Исходя из вышеизложенного, необходимо определить наиболее подходящую величину базиса фотографирования на основе следующих условий:

1) размера базиса не менее 85 мм;

2) обеспечения перекрытий между снимками;

3) эргономики съемочной системы.

Исследования и практические рекомендации по фотограмметрической обработке [56, 58, 92] показывают, что для получения качественного результата при наземной съемке целесообразно обеспечивать перекрытие соседних снимков на уровне 80 %. Поэтому необходимо перекрытие ближней дистанции съемки $D_{min} = 0{,}5$ м.

Поскольку угол поля зрения не зависит от выбранного режима видеосъемки – 5,3K или 4K – базис фотографирования стереосистемы, обеспечивающий взаимное перекрытие снимков 80 %, может быть определен с учетом угла поля зрения камеры, приведенного в таблице 6. Расчет базиса выполнялся по формуле 12:

$$B_{cc} = 2D_{min} \cdot tg\left(\frac{FOV_x}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{P_{cc}}{100}\right) = 2 \cdot 50 \cdot tg\left(\frac{102}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{80}{100}\right) = 24{,}7 \text{ см}, \qquad (12)$$

где D_{min} – минимальное отстояние от объекта (мм);

FOV_x – угол поля зрения относительно длинной стороны матрицы;

P_{cc} – перекрытие снимков внутри стереосистемы (%).

Для ответа на вопрос о возможности использования данного значения базиса фотографирования была сформирована таблица 9, в которой отражена оценка фактических перекрытий снимков, продольного параллакса и погрешности определения координаты точки по глубине.

Таблица 9 – Оценка перекрытия, продольного параллакса и погрешности определения глубины при различных дистанциях съемки

№	**Режим съемки**	$\boldsymbol{l_x}$, пикс	$\boldsymbol{D}$, м	**GSD, мм/пикс.**	$\boldsymbol{P}_{cc}$, %	**p**, пикс	$\boldsymbol{m_z}$, при $\boldsymbol{m_p = 0,5 \cdot pxl}$, мм
1	5,3K	5568	0,5	0,195	80	1127	0,22
			1,0	0,390	90	564	0,89
			1,5	0,585	93	376	2,00
			2,0	0,779	95	281	3,55
			2,5	0,974	96	225	5,54
2	4K	3840	0,5	0,270	80	777	0,32
			1,0	0,539	90	389	1,29
			1,5	0,809	93	259	2,89
			2,0	1,078	95	194	5,15

Данные, по которым сформирована таблица 9, получены по формулам 13–15:

а) перекрытие снимков стереосистемы, P_{cc}:

$$P_{\text{cc}} = \left(1 - \frac{B_{cc}}{2 \cdot D \cdot tg\left(\frac{FOV_x}{2}\right)}\right) \cdot 100\% \qquad (13)$$

где B_{cc} – базис фотографирования стереосистемы на местности (мм);

D – отстояние от объекта (мм);

FOV_x – угол поля зрения относительно длинной стороны матрицы.

б) продольный параллакс, p:

$$p = \frac{f_{pix} \cdot B_{cc}}{D}, \qquad (14)$$

где B – базис фотографирования стереосистемы на местности (мм);

D – отстояние от объекта (мм);

$$f_{pix} = \frac{l_x}{2tg(\frac{FOV_x}{2})} = \frac{5568}{2tg(51°)} = 2254 \text{ пикс}$$

в) ошибка определения координаты точки по глубине:

$$m_z = \frac{D^2}{f \cdot B_{cc}} m_p \,, \tag{15}$$

где B_{cc} – базис фотографирования стереосистемы на местности (мм);

D – отстояние от объекта (мм);

f – фокусное расстояние (мм);

m_p – ошибка измерения координат точки на снимке (мм);

Таким образом, базис стереосистемы выбирался с учетом необходимости обеспечения требуемого взаимного перекрытия изображений и точности определения координат по глубине при различных режимах видеосъемки. Величина базиса ограничивалась требованием к поперечному перекрытию изображений на минимальной дистанции $D_{min} = 0{,}5$ м. При заданном перекрытии $P_{\text{cc}} = 80$ % расчет по горизонтальному углу поля зрения камеры дал значение базиса B_{cc} = 24,7 см. С учетом конструктивных требований базис стереосистемы был принят равным 25 см.

Как показано в таблице 9, при выбранном базисе поперечное перекрытие изображений в рассматриваемом диапазоне расстояний составляет от 80 до 96 % и не зависит от режима видеосъемки, поскольку горизонтальный угол поля зрения камеры остается неизменным. При этом рабочий диапазон съемки обусловлен не только величиной перекрытия и точностью определения глубины, но и пространственным разрешением изображения. В режиме 5,3K требование $GSD \leq 1$ мм/пикс. выполняется на расстояниях до 2,5 м, тогда как в режиме 4K максимальная рабочая дистанция сокращается до 2 м.

По мере увеличения расстояния до объекта величина параллакса уменьшается, а теоретическая ошибка определения координат по глубине возрастает. В режиме 5,3K на расстоянии 2,5 м параллакс составляет 225 пикс., а ошибка определения глубины – 5,54 мм. В режиме 4K на расстоянии 2 м параллакс

составляет 194 пикс., а ошибка определения глубины – 5,15 мм. Полученные значения параллакса являются достаточными для устойчивого определения координат точек по глубине [64].

Полученные результаты подтверждают обоснованность выбора базиса фотографирования стереосистемы $B_{cc} = 25$ см: он обеспечивает поперечное перекрытие не менее 80 % на минимальной дистанции съемки и требуемую точность определения координат по глубине в рабочих диапазонах обоих режимов видеозаписи. Кроме того, выбранная величина базиса обусловливает приемлемые габариты конструкции и удобство практического использования стереосистемы.

2.1.3 Опытный образец стереосистемы

Дополнительно при проектировании следует обеспечить достаточную жесткость крепления, возможность быстрой юстировки и надежной фиксации взаимного положения камер, чтобы заданный базис сохранялся на всем протяжении полевых работ.

После определения геометрических параметров съемочной системы возможно осуществить сборку опытного образца стереосистемы (рисунок 5). Конструктивная схема стереосъемочного модуля:

1. Две камеры GoPro HERO 11 Black, расположенные на расстоянии базиса фотографирования относительно друг друга.
2. Алюминиевая штанга для крепления камер – обеспечивает жесткость и стабильность базиса фотографирования; предпочтительна разметка/шкала для повторяемой установки расстояния и угла схождения.
3. Рукоятка для полевой работы – повышает эргономику удержания и маневренность при съемке; крепление через стандартную резьбу 1/4″ позволяет использовать штатив или монопод при необходимости.



Рисунок 5 – Опытный образец стереосистемы

Дополнительно требуется определить алгоритм работы стереосистемы, который обеспечит синхронизацию видеозаписей с двух камер и реализуется без вмешательства в конструкцию самих устройств.

На практике применяются три основных подхода к синхронизации камер:

а) сопоставление звуковых дорожек видеозаписей;

б) использование таймера (визуального маркера времени), размещенного в кадре;

в) применение аппаратных систем синхронного запуска видеозаписи.

Для выбора метода целесообразно опираться на опыт, накопленный в мультикамерной съемке и монтаже [28], а также в стереоскопической видеосъемке для создания виртуальной реальности [74]. Наиболее распространенным на практике является синхронизация видеозаписей по звуковой дорожке, в частности по характерной амплитуде аудиосигнала. В кинопроизводстве эту роль традиционно выполняет хлопушка-нумератор, обеспечивающая синхронизацию по звуку хлопка и маркировку дублей; нередко в нее интегрируется секундомер. При стереосъемке для фиксации опорного звукового маркера зачастую достаточно короткого хлопка ладонями или короткого импульсного писка в начале записи.

Для обеспечения контролируемого качества исходных данных и воспроизводимости результатов в полевых условиях стереосистема дополняется

комплектом опорно-тестовых объектов: ОМОМ размером 1 × 1 м и панелью контроля качества изображений (рисунок 6). Их совместное применение позволяет оперативно оценивать разрешающую способность получаемых изображений, корректность цветопередачи и дешифрируемость деталей в зависимости от контрастности объектов, а также своевременно выявлять факторы, приводящие к снижению качества (смазы, блики, ошибки экспозиции).



Рисунок 6 – ОМОМ и панель контроля качества изображений

ОМОМ представляет собой жесткую рамную конструкцию, формирующую прямой угол с фиксируемой металлической пластиной для исключения изменений геометрии модуля. Для автоматизированного отождествления на изображениях на каждом из трех внешних узлов размещены по три высококонтрастных кодированных маркера. Конструкция оснащена двумя цилиндрическими уровнями, ориентированными во взаимно перпендикулярных плоскостях, что позволяет оперативно проводить горизонтирование модуля и исключать

систематические наклоны. Подъемные опоры (винты) обеспечивают выравнивание на неровной поверхности и стабильную фиксацию положения при видеосъемке. Наличие компаса позволяет направлять угольник на север, что облегчает последующее ориентирование фотограмметрической модели. Функционально угольник используется в качестве геометрического эталона.

Для данного тест-объекта в камеральных условиях были выполнены промеры между кодированными маркерами, и полученные значения приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Расстояния между опорными точками ОМОМ

№	Описание (при ориентации на север)	Расстояние между маркерами
1	Угловой маркер – Северный маркер (М9–М10)	95 мм
2	Угловой маркер – Западный маркер (М9–М8)	94,8 мм

Панель контроля качества изображений предназначена для оценки качества радиометрической и разрешающей способности съемочной системы непосредственно в момент съемки.

Панель контроля качества изображений состоит из следующих тест-объектов:

1) радиальная мира для оценки разрешающей способности;

2) цветовая палитра из 24 эталонных цветов для контроля баланса белого и стабильности цветопередачи;

3) набор из 30 тест-объектов различного линейного размера и относительного контраста для оценки порога дешифрируемости минимальных деталей.

Цветовая палитра была сформирована из набора цветов, используемых для цветовой мишени X-Rite [61].

Для набора из 30 тест-объектов был определен коэффициент контрастности. Расчеты были выполнены по методике, предложенной W3C [9, 104], которая позволяет определить уровень контраста по формуле 16:

$$C_r = \frac{L_1 + 0{,}05}{L_2 + 0{,}05}, \quad (16)$$

где L_1 и L_2– относительная яркость цвета, определяемая по формуле 17:

$$L = 0{,}2126 * R + 0{,}7152 * G + 0{,}0722 * B, \quad (17)$$

где R, G, B – значения интенсивности красного, зелёного и синего цветовых каналов соответствующего пикселя исходного цифрового изображения в диапазоне от 0 до 255.

Данный критерий основан на том принципе, что минимальный контраст – это отношение белого цвета к белому, при котором $C_r = 1$, а максимальный уровень контраста достигается между черным и белым цветами, когда $C_r = 21$. Примитивы были разбиты на семь уровней относительного контраста, значения которых приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Относительные контрасты тестовых объектов

Параметр	**Элемент тест-объекта**						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Цвет, Hex	000000	242424	484848	6D6D6D	979797	BCBCBC	E0E0E0
C_r	21	15,5	9	5	3	2	1,5

Включение указанных тестовых объектов в состав полевого комплекта позволяет обеспечивать объективный контроль качества получаемой продукции (изображений, фотограмметрических и трехмерных моделей).

2.2 Калибровка стереосистемы

Для восстановления связки проектирующих лучей, существовавшей в момент съемки, необходимо знать элементы внутреннего ориентирования камеры: фокусное расстояние, координаты главной точки снимка и параметры дисторсии объектива. Определение данных параметров является обязательным этапом подготовки камеры к выполнению фотограмметрической съемки и осуществляется

посредством ее калибровки. В настоящее время применяются два основных подхода к калибровке цифровых камер [8]:

1) по пространственному тест-объекту;

2) по плоскому тест-объекту.

Калибровка камер GoPro HERO11 Black выполнялась на плоском тест-объекте с использованием ЦФС Agisoft Metashape Professional (разработчик программного обеспечения рекомендует для наземной (ближней) фотограмметрической съемки выполнять калибровку по плоскому тест-объекту) [53].

При выполнении калибровки камеры разработчик программного обеспечения рекомендует соблюдать следующие условия: на каждое фокусное расстояние должно быть сделано как минимум три снимка шахматной доски, а также количество элементов доски по каждой стороне матрицы должно быть не менее 10 квадратов на одну сторону изображения [53]. В качестве основных параметров, нуждающихся в определении в процессе калибровки, выступают [68, 91]: f– физическое фокусное расстояние; c_x, c_y – координаты главной точки снимка; $k_1, k_{2,}, \ k_3$ – коэффициенты радиальной дисторсии; p_1, p_2 – коэффициенты тангенциальной дисторсии.

На первом этапе калибровки было получено пять снимков тест-объекта: один снимок, при котором оптическая ось съемочной системы перпендикулярна поверхности тест-объекта; четыре сделанных под углом (с отклонением по вертикальной и горизонтальной плоскостям) относительно поверхности тест-объекта.

После съемки тест-объекта снимки были загружены в ЦФС Agisoft Metashape Professional для выполнения калибровки. Так как изображения, получаемые из видеопотока, не содержат метаданных, то программа калибровки не определит их автоматически. Поэтому перед данным процессом необходимо вручную указать исходные значения фокусного расстояния камеры, а также размера пикселя матрицы, определенные ранее. После этого следует выполнить калибровку камеры, а затем сохранить полученные параметры для последующего использования при фотограмметрической обработке.

Дополнительно был уточнен фактический базис фотографирования стереосистемы по изображениям маркированного тест-объекта с известными координатами точек. В результате фотограмметрической обработки были определены элементы внешнего ориентирования каждой камеры: координаты центров проекции и угловые элементы ориентирования. На основании полученных значений установлено фактическое взаимное положение камер и уточнена длина базиса фотографирования.

Калибровка стереосистемы выполнялась путем съемки плоского тест-объекта с нанесенными кодированными маркерами, координаты которых известны в системе координат тест-объекта. Съемка выполнялась по схеме, приведенной на рисунке 7. Стереосистема была установлена на штативе на расстоянии 50 см от плоскости тест-объекта, а затем горизонтирована.

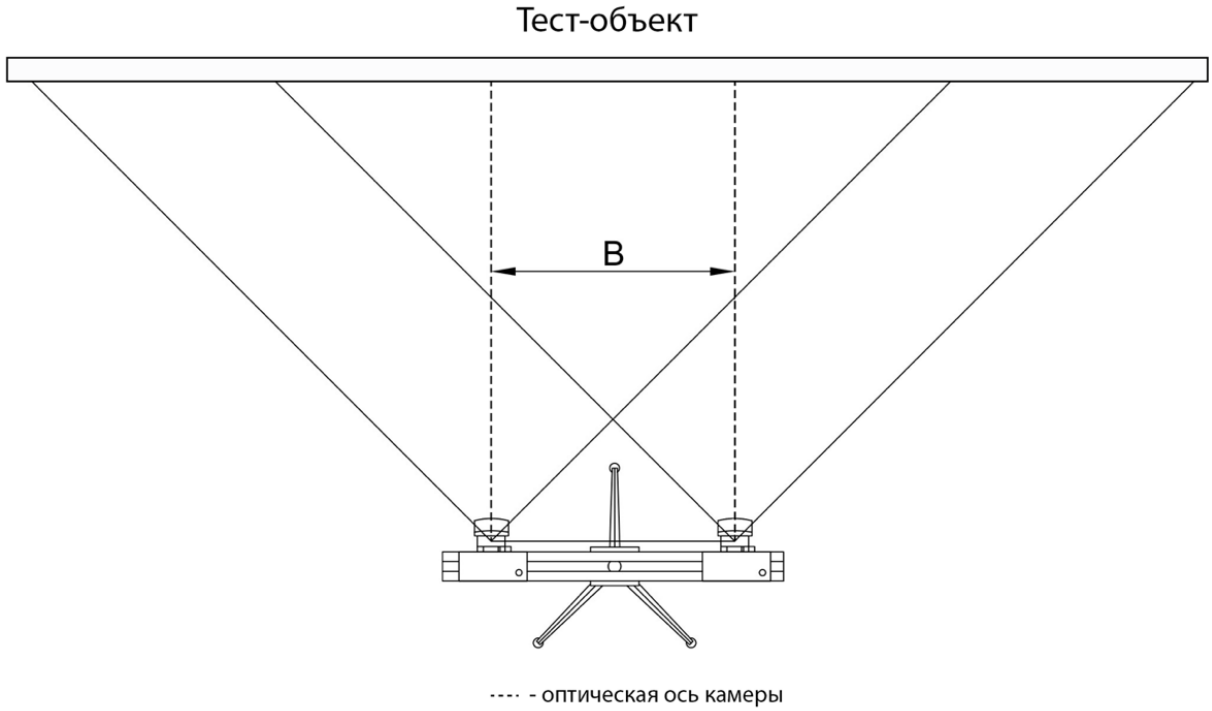


Рисунок 7 – Схема проведения калибровки стереосистемы

Далее по результатам съемки были определены элементы внешнего ориентирования путем решения обратной фотограмметрической засечки. В результате были получены как линейные, так и угловые значения ЭВО (таблица 12).

Таблица 12 – ЭВО камер стереосистемы

№	Камера	Элементы внешнего ориентирования снимка					
		X, м	Y, м	Z, м	ω°	ϕ°	κ°
1	Левая	−0,142	−0,048	+0,499	+0,040	−0,060	+0,020
2	Правая	+0,111	−0,046	+0,502	+0,020	−0,040	−0,010

Размеры угловых элементов внешнего ориентирования снимков незначительны, что позволяет считать оптические оси съемочной системы практически параллельными и лежащими в одной плоскости. Полученные линейные элементы внешнего ориентирования дают возможность определить фактический базис фотографирования как длину вектора между центрами фотографирования по формуле 18:

$$\overrightarrow{|AB|} = \sqrt{\Delta AB_x^2 + \Delta AB_y^2 + \Delta AB_z^2} = \sqrt{0{,}253^2 + 0{,}002^2 + 0{,}003^2} = 0{,}253 \text{ м} \quad (18)$$

где ΔAB–разности координат центров проекций камер по осям X, Y и Z соответственно;

Полученное расстояние между центрами проекции камер (0,253 м) использовалось при фотограмметрической обработке в качестве известного линейного размера для масштабирования фотограмметрической модели.

2.3 Обработка результатов фотограмметрической видеосъемки, полученной стереосистемой с фиксированным базисом

Ключевым аспектом при извлечении изображений из видеозаписи является понимание принципов формирования и кодирования видеопотока. Современные методы сжатия цифровых видеозаписей основаны на разделении видеопотока на GOP (рисунок 8). Каждая такая группа представляет собой последовательность взаимосвязанных кадров, структура которой обеспечивает компромисс между степенью сжатия, скоростью обработки и точностью восстановления изображения. В составе GOP могут использоваться следующие типы кадров:

– I-frame (Intra frame) – кадр, кодируемый независимо от других. Он содержит полную информацию об изображении и, как правило, рассматривается как ключевой кадр;

– P-frame (Predicted frame) – кадр, содержащий информацию не обо всем изображении, а только об изменениях относительно предыдущих опорных кадров;

– B-frame (Bi-predicted frame) – кадр, кодируемый с использованием информации как от предыдущих, так и от последующих кадров.

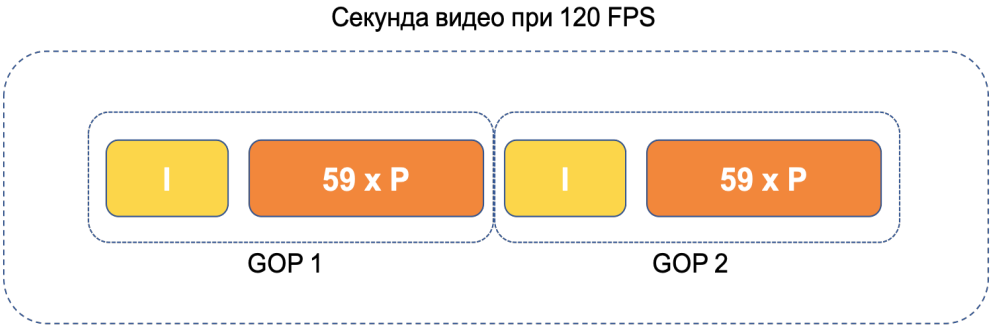


Рисунок 8 – Структура 1 секунды видеозаписи при частоте 120 кадр/с

Для анализа структуры видеозаписи, получаемой с экшн-камеры GoPro HERO11 Black, была использована утилита FFprobe, предназначенная для извлечения и анализа параметров мультимедийных потоков: типов кадров, временны́х меток и характеристик кодирования видеозаписи. По результатам проведенного исследования установлено, что видеозапись, полученная камерой GoPro HERO11 Black, формируется с использованием только кадров типов I-frame и P-frame. Кадры типа B-frame в исследованных видеозаписях отсутствуют. При этом I-frame формируются с периодичностью 0,5 с вне зависимости от частоты кадров видеопотока. Подробные количественные характеристики структуры GOP для различных режимов съемки приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Структура GOP в зависимости от частоты кадров

№	FPS	GOP, кадров	Состав GOP, кадров
1	30	15	1 I + 14 P
2	60	30	1 I + 29 P
3	120	60	1 I + 59 P

В дальнейшей работе при синхронизации и обрезке видеозаписей предполагается выполнять обрезку не только по ключевым кадрам, как при классическом подходе, но и с использованием декодирования видеопотока с последующим восстановлением зависимых P-frames. Аналогичный подход будет применяться и при извлечении стереопар, что обеспечит более высокую точность временно́й синхронизации.

2.3.1 Синхронизация видеозаписей и формирование стереопар

Синхронизация видеоданных, полученных с двух камер, а также корректное извлечение стереопар относятся к ключевым этапам подготовки материалов, поскольку напрямую влияют на точность последующей фотограмметрической модели. Даже незначительные рассогласования по времени приводят к ошибкам в оценке изменяющегося базиса между камерами при динамичной съемке, в результате чего его нельзя использовать как точный и достоверный.

В рамках диссертационного исследования одной из ключевых задач была разработка алгоритма синхронизации видеозаписей с двух камер, извлечения стереопар, а также получения данных телеметрии видеозаписи GPMF [70]. Дополнительно для удобства использования был разработан графический интерфейс программы.

Процесс можно разделить на следующие ключевые этапы:

1) синхронизация видеозаписей;
2) извлечение целевых кадров;
3) извлечение данных телеметрии видеозаписей и формирование каталога координат.

Программная часть алгоритма была реализована на языке Python 3 с использованием специализированных библиотек и внешних программных средств, ориентированных на обработку аудио- и видеоданных.

В качестве основной библиотеки для вычислений применялась NumPy [85], обеспечивающая эффективную работу с массивами данных и реализацию алгоритмов цифровой обработки сигналов. Для взаимодействия с мультимедийными файлами используется внешняя утилита командной строки FFmpeg [67], которая обеспечивает извлечение аудиодорожек в формате PCM (Pulse-Code Modulation – импульсно-кодовой модуляции), высокоточное обрезание видеозаписей без перекодирования (с учетом временно́го позиционирования по кадрам), управление составом потоков (видео, аудио, телеметрия) и получение технических метаданных медиафайлов. Дополнительно использовалась утилита ExifTool (Image-ExifTool), предназначенная для анализа и парсинга метаданных, с возможностью их представления как в текстовом, так и в JSON-формате, что облегчает последующую автоматизированную обработку.

Графический интерфейс пользователя реализован с помощью библиотеки PySide6, предоставляющей набор виджетов для выбора файлов, задания параметров обработки и отображения хода выполнения операций.

Этап 1. Синхронизация видеозаписей с двух камер.

По результатам видеосъемки на систему с фиксированным базисом на выходе пользователи получают два видеофайла, каждый из которых содержит видеопоток, звуковую дорожку и, возможно (при наличии), дополнительные служебные потоки (в том числе телеметрию GPMF). В начале записи оператор воспроизводит звуковой маркер (хлопок ладоней, короткий импульсный писк), который фиксируется обоими микрофонами.

Цель алгоритма – оценить моменты, соответствующие одному и тому же физическому событию (появлению звукового маркера) в аудиодорожках двух файлов, и сформировать новые видеофайлы, обрезанные и выровненные таким образом, чтобы звуковой маркер имел одинаковые временны́е координаты начала видеозаписи в обоих выходных роликах, а также одинаковую длительность. При этом видеопоток и сопутствующие данные сохраняются без перекодирования, что исключает потерю качества и ускоряет обработку.

Алгоритм синхронизации двух видеозаписей по акустическому маркеру функционирует следующим образом.

На вход программа получает два видеофайла, записанных с разных камер. Для каждого файла с помощью утилиты FFmpeg извлекается аудиодорожка и преобразуется в монофонический сигнал с фиксированной частотой дискретизации. Далее для каждого аудиосигнала выполняется автоматический поиск момента появления звукового маркера: в заданном начальном интервале записи (как правило, первые несколько секунд) формируется окно поиска. Звуковой маркер определяется путем нахождения отсчета с максимальной по модулю амплитудой в этом временно́м окне [27], т.е. вычисляется индекс по формуле 19:

$$n^* = \arg\max n \in [n_1, n_2]|x[n]|\,, \tag{19}$$

где x[n] – дискретный аудиосигнал;

$[n_1, n_2]$ – границы окна поиска;

n^* – номер отсчета, соответствующий моменту появления звукового маркера.

Временна́я координата звукового маркера вычислялась по формуле 20:

$$t_{\text{маркера}} = \frac{n^*}{f_s}\,, \tag{20}$$

где f_s– частота дискретизации аудиосигнала.

Полученные параметры (время начала и общая длительность) используются для вызова FFmpeg в режиме точного позиционирования: сегменты вырезаются с указанием времени начала и длительности без перекодирования видеопотока (что позволяет сохранить метаданные видеозаписи), при этом применяется режим точного поиска, обеспечивающий обрезку с точностью до отдельных кадров, а не грубое приведение к ближайшему ключевому кадру. В результате на выходе формируются два новых видеофайла одинаковой длительности, в которых момент появления звукового маркера расположен на идентичной временно́й позиции от начала записи, что обеспечивает корректную синхронизацию материалов с разных камер при дальнейшей обработке и анализе.

Интерфейс программы (рисунок 9) позволяет добавлять путь к левому и правому файлу видеозаписи, указывать папку для сохранения результатов обработки, название для выходных видеофайлов, параметры «Окно маркера» (временной интервал, в который ожидается появление звукового маркера), а также «Запас до маркера» (временной интервал, предшествующий звуковому маркеру, который необходимо оставить на видеозаписи).

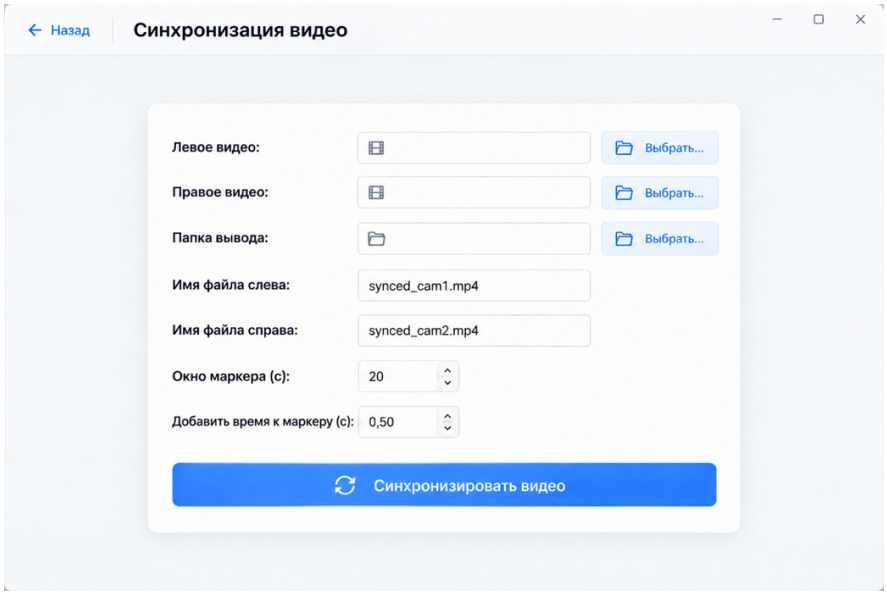


Рисунок 9 – Интерфейс программы синхронизации видеозаписей

Этап 2. Извлечение целевых кадров.

После выполнения временно́й синхронизации видеозаписей необходимо перейти к извлечению пар изображений, соответствующих левой и правой камерам. Этот этап является критически важным, поскольку точность извлечения кадров напрямую влияет на корректность использования измеренного базиса фотографирования. Базис (взаимное положение и ориентация камер) был предварительно определен в лабораторных условиях при жестко зафиксированном взаимном расположении камер. Если при извлечении кадров из видеозаписи левой и правой камер будет наблюдаться временное смещение, то фактические геометрические условия съемки уже не будут строго соответствовать условиям калибровки, и, следовательно, значения измеренных базисов нельзя считать достоверными для последующих вычислений.

Разработанный алгоритм предназначен для автоматизированного извлечения кадров из двух синхронизированных видеозаписей, соответствующих левой и правой камерам, с заданным шагом по кадрам, начиная от известного момента появления звукового маркера. На вход программа получает пути к двум видеофайлам, записанным левой и правой камерами. Дополнительно необходимо указать следующие параметры:

1) частоту извлечения кадров (N) – параметр, определяющий извлечение каждого N-го кадра из видеозаписи программой;

2) формат вывода изображений – JPEG с дополнительным сжатием, PNG без сжатия;

3) уровень сжатия: быстрый, сбалансированный режимы, максимальное качество (влияет на размер итогового файла).

Основная операция извлечения реализована через формирование и выполнение команд FFmpeg: для каждой видеозаписи создается директория (left_camera и right_camera), после чего выполняется выборка каждого N-го кадра. Затем изображения сохраняются в выбранную директорию и именуются по схеме, в результате чего создаются файлы вида 0001_l.jpg, 0002_l.jpg и т.д., что гарантирует согласованную нумерацию левых и правых изображений и удобство при работе со стереопарами изображений, полученными с одной точки. При извлечении кадров для фотограмметрической обработки рекомендуется использовать формат PNG, так как при его создании используется алгоритм сжатия DEFLATE («Без потерь»), что не ухудшит характеристики изображений.

Этап 3. Извлечение данных телеметрии видеозаписи и формирование каталога координат.

При наличии в видеофайлах служебных потоков, содержащих телеметрические данные, например GPMF, алгоритм извлекает записанные GPS-координаты положения камеры. Для каждого сформированного изображения по временной отметке определяется соответствующее ему положение камеры.

Если частота регистрации координат GPS-приёмником ниже частоты извлечения кадров, координаты промежуточных изображений определяются

интерполяцией между соседними записями с учётом времени получения кадра. Это позволяет сформировать координаты для каждого извлечённого изображения независимо от различий в частоте записи телеметрии и формирования стереопар.

По результатам выполнения алгоритма формируется текстовый каталог координат центров фотографирования, содержащий имя изображения, географическую широту и долготу. Нумерация записей соответствует именам файлов изображений, что обеспечивает их однозначное сопоставление.

Полученные координаты могут использоваться для ориентировочного определения положения изображений и предварительного позиционирования фотограмметрической модели. При этом координаты, регистрируемые встроенным GPS-приёмником камеры, не следует рассматривать как геодезическую основу, поскольку точность их определения не соответствует точности, обеспечиваемой геодезическими спутниковыми приёмниками. По этой причине данные телеметрии не используются для контроля метрической точности фотограмметрической модели и её точного геодезического ориентирования. Скорость работы разработанного алгоритма обеспечивает формирование до 360 стереопар в час.

Разработанная в рамках диссертационного исследования программа для ЭВМ была зарегистрирована в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатенте) (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025693254 (приложение А)) [36].

2.3.2 Алгоритм построения фотограмметрической модели по стереопарам с известным базисом

В рамках исследования разработана система для выполнения фотограмметрической видеосъемки двумя синхронно работающими камерами, у которых известен базис фотографирования. Также был разработан алгоритм синхронизации видеозаписей, извлечения изображений, а также формирования стереопар.

В работе будет рассмотрен алгоритм обработки данных, полученных с использованием системы для фотограмметрической видеосъемки, в ЦФС Agisoft Metashape Professional (ранее – Agisoft PhotoScan). Программный продукт PhotoScan был представлен в 2010 году и в настоящее время широко применяется для решения задач фотограмметрической обработки, построения трехмерных моделей на основе изображений.

Выбор цифровой фотограмметрической системы Agisoft Metashape Professional обусловлен накопленным опытом ее применения в археологических исследованиях, где данный программный комплекс выступает одним из наиболее распространенных решений для фотограмметрической обработки материалов наземной и аэрофотосъемки. Указанный тезис подтверждается как российскими публикациями [14, 23, 29], так и международными исследованиями [52, 78, 101], в которых ЦФС Agisoft Metashape Professional рассматривается как широко используемый инструмент для фотограмметрической обработки материалов съемки археологических объектов.

Работа ЦФС Agisoft Metashape Professional основана на последовательном решении задач автоматического ориентирования снимков и последующего плотного многовидового сопоставления. На этапе уравнивания блока фототриангуляции, соответствующем подходу SfM, по серии перекрывающихся изображений выполняются поиск и отождествление связующих точек, определение элементов внешнего ориентирования снимков, уточнение параметров внутреннего ориентирования и уравнивание блока по методу связок. В результате формируется уравненный фотограмметрический блок, являющийся геометрической основой фотограмметрической модели объекта. Далее применяется метод MVS, соответствующий плотному многовидовому стереосопоставлению, при котором по ориентированным снимкам строится плотное облако точек или карты глубины, используемые для последующего получения детализированной трехмерной геометрии объекта или поверхности.

Формирование фотограмметрической модели объекта в ЦФС Agisoft Metashape Professional включает последовательное выполнение комплекса технологических операций:

1. Подготовка проекта для фотограмметрической обработки.
2. Фототриангуляция изображений по методу связок, при которой связующие точки автоматически определяются и сопоставляются алгоритмами SfM/MVS.
3. Уравнивание блока фототриангуляции по методу связок с одновременной самокалибровкой камер и уточнением элементов их внутреннего ориентирования.
4. Масштабирование и горизонтирование фотограмметрической модели по известным линейным и угловым параметрам масштабных ориентиров.

При необходимости получения производных фотограмметрических продуктов – ортофотоплана, трехмерной модели, ЦМР/ЦМП – технологическая схема обработки дополняется следующими этапами:

5. Построение плотного облака точек методами плотного многовидового сопоставления, в том числе с использованием алгоритмов квазиглобального сопоставления, например SGM [50, 77].
6. Построение цифровой модели рельефа.
7. Построение ортофотоплана.
8. Построение триангуляционной текстурированной модели для последующего анализа и визуализации.

Перечисленные процедуры являются стандартными для большинства современных цифровых фотограмметрических систем. Однако конструктивные особенности стереосистемы и специфика обработки получаемых материалов предъявляют дополнительные требования к отдельным этапам, в частности к подготовке проекта и внешнему ориентированию фотограмметрической модели.

Подготовка проекта должна включать обязательный импорт данных калибровки камеры, поскольку изображения, полученные из видеозаписи, не содержат сведений об элементах внутреннего ориентирования камер, а также о фокусном расстоянии и эффективном размере пикселя матрицы.

Масштабирование и ориентирование блока фототриангуляции являются ключевыми этапами при фотограмметрической обработке, так как одно из основных преимуществ стереосистемы заключается в возможности получения измеримых фотограмметрических моделей без необходимости определения координат центров фотографирования или маркирования наземных опорных точек.

Классический алгоритм масштабирования и ориентирования фотограмметрической модели основан на процедуре приведения «свободной» модели к системе координат объекта (с использованием опорных точек и/или координат центров фотографирования в системе координат объекта) или к локальной системе координат путем масштабирования и горизонтирования фотограмметрической модели с помощью масштабных ориентиров: масштабных линеек/реек, опорных точек (в локальной системе координат), базиса фотографирования [22, 48]. При совместном уравнивании по методу связок известный базис фотографирования задает масштаб относительных фотограмметрических моделей стереопар, за счет чего происходит масштабирование всей фотограмметрической модели.

Для практической реализации был подготовлен программный модуль на языке программирования Python, который поддерживает ЦФС Agisoft Metashape Professional [35]. Данный программный модуль автоматизирует задание базиса фотографирования между центрами проекций камер в проекте ЦФС Agisoft Metashape Professional путем создания набора масштабных линеек между синхронными снимками двух камер (левой и правой) в составе стереосистемы. На первом этапе задаются два параметра базиса: фактическое расстояние между камерами DISTANCE (в метрах) и точность этого расстояния ACCURACY (в метрах). Эти значения трактуются как априорная информация о базисе

стереосистемы: расстояние фиксировано конструктивно, а его возможное отклонение ограничено заданной точностью измерения/сборки.

Далее программный модуль получает доступ к текущему проекту ЦФС Agisoft Metashape Professional и активному блоку обработки, содержащему набор изображений, участвующих в уравнивании блока фототриангуляции. Для корректного сопоставления кадров двух камер используется формат записи имени снимка: предполагается, что снимки левой камеры имеют суффикс _l, а правой – _r, а оставшаяся часть имени содержит общий идентификатор кадра (номер стереопары). На основе этого правила формируются два словаря: left_cams и right_cams. Каждый словарь индексируется идентификатором кадра и хранит ссылку на соответствующий объект камеры ЦФС Agisoft Metashape Professional. При построении словарей учитываются только используемые в процессе обработки изображения, что исключает отключенные/неиспользуемые снимки из дальнейшей обработки.

После формирования пар выполняется проход по всем идентификаторам, присутствующим в левой камере. Для каждого идентификатора проверяется наличие соответствующего кадра в правой камере. Если пара найдена, в блоке обработки создается масштабная линейка с помощью вызова addScalebar(left, right), связывающая две камеры как две опорные точки измерения. Для каждой созданной линейки задаются параметры эталонного расстояния и точности: scalebar.reference.distance = DISTANCE и scalebar.reference.accuracy = ACCURACY.

Таким образом, результатом работы алгоритма является набор масштабных линеек, автоматически сформированных между всеми найденными синхронными парами снимков левой и правой камер. В дальнейшем эти линейки используются ЦФС Agisoft Metashape Professional как данные о масштабе съемки и позволяют выполнить масштабирование блока фототриангуляции. Программный модуль автоматизации создания масштабных линеек приведен в приложении Б. Альтернативным решением является использование встроенного функционала ЦФС Agisoft Metashape Professional по обработке съемки с многокамерных систем [35]. Однако сам алгоритм обработки данных с многокамерной системы

средствами ЦФС сложнее, чем использование классического подхода к обработке с использованием программного модуля на Python.

В результате предложенного процесса фотограмметрической обработки формируется масштабированная фотограмметрическая модель [27], которая может использоваться в качестве основы для выполнения измерений. Однако данная модель будет иметь произвольные угловые элементы внешнего ориентирования, а также свою локальную систему координат, отличную от системы координат объекта.

Для масштабирования и ориентирования фотограмметрической модели автором предлагается использовать ОМОМ. При установке на объекте археологического наследия модуль приводится в горизонтальное положение, а одна из его осей ориентируется по направлению на север с помощью компаса. Известные линейные размеры и взаимно перпендикулярные направления элементов ОМОМ позволяют задать масштаб и угловую ориентацию модели. В результате фотограмметрическая модель приводится к локальной системе координат, одна из осей которой ориентирована на север, что соответствует принятому порядку подготовки археологических планов и чертежей.

Для последующего приведения модели к системе координат объекта предлагается выполнять измерение кодированных маркеров ОМОМ с использованием геодезического оборудования. Это позволяет определить недостающие линейные параметры внешнего ориентирования, характеризующие смещение локальной системы координат относительно системы координат объекта. В результате формируется ориентированная фотограмметрическая модель ОАН, координаты которой определены в системе координат объекта. В зависимости от задач документирования отдельные этапы указанной технологической схемы могут быть исключены.

2.4 Оценка точности синхронизации видеозаписей и измерительной способности стереосистемы

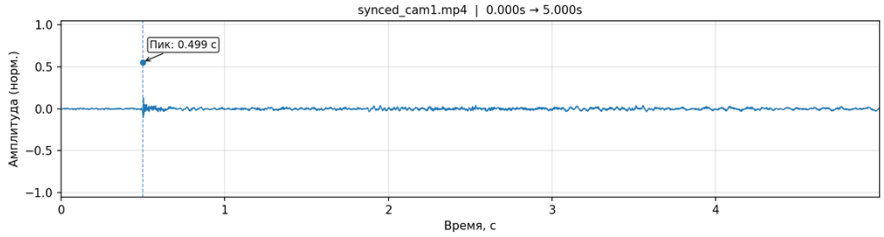
Важным аспектом является оценка точности синхронизации и извлечения изображений из видеозаписей, так как результат напрямую влияет на то, возможно ли при дальнейшей обработке использовать измеренный в камеральных условиях базис между камерами.

Основными факторами, определяющими потенциальную погрешность извлечения синхронных стереопар из видеопотоков, являются: дискретизация видеоряда, задаваемая частотой кадров, точность локализации звукового маркера на временно́й оси видеозаписи, а также точность обрезки начальных фрагментов двух видеозаписей перед извлечением изображений. Кроме того, влияние оказывает используемый способ декодирования, поскольку при извлечении кадров из сжатого видеопотока необходимо корректно учитывать не только ключевые (I-frames), но и промежуточные предсказанные кадры (P-frames), восстановление которых зависит от структуры GOP и может вносить дополнительную неопределенность во временну́ю привязку извлекаемых изображений.

Для оценки точности синхронизации видеозаписей дополнительно был разработан программный модуль, позволяющий строить график амплитуды аудиосигнала в зависимости от временно́го интервала видеозаписи. На вход программа получает путь к видеозаписи и с помощью утилиты FFmpeg извлекает из него аудиодорожку в виде потока отсчетов с заданной частотой дискретизации и числом каналов.

Для построения графика использовалась библиотека Matplotlib. Сигнал отображается как функция времени с подписями осей и опционально сеткой, причем координаты найденного пика дополнительно выделяются вертикальной линией, маркером и текстовой подписью с точностью до тысячных долей секунды. Полученное изображение сохраняется в PNG-файл. Пример осциллограммы, полученной по двум синхронизированным видеозаписям, приведен на рисунке 10.

а)



б)

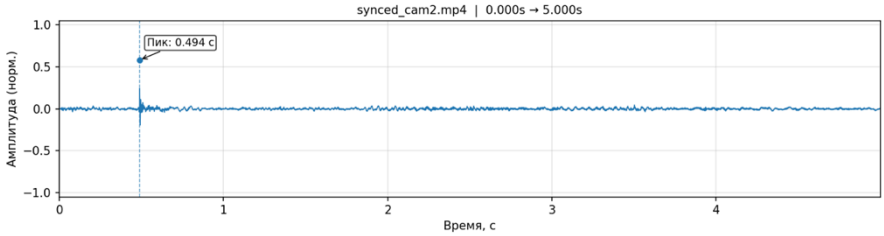


Рисунок 10 – Осциллограмма аудиосигнала: а) левая камера; б) правая камера

Для оценки точности работы алгоритма был проведен эксперимент на девяти различных видеозаписях, включающих как полевые, так и камеральные съемки. Во всех случаях ошибки при детектировании момента появления звукового маркера не наблюдались. Сопоставление амплитуд аудиосигналов показало, что погрешность синхронизации видеозаписей не превышает 0,005 с.

Чтобы оценить точность извлечения кадров, была выполнена экспериментальная съемка плоского тест-объекта с использованием разработанной стереосистемы. На поверхность тест-объекта были нанесены кодированные маркеры – это обеспечило автоматизированное и однозначное распознавание опорных точек на изображениях и исключило влияние субъективного фактора при измерениях. Координаты маркеров в системе тест-объекта были предварительно определены с применением электронного тахеометра, что позволило использовать их в качестве метрически достоверной основы для последующей обработки.

Съемка проводилась в двух режимах частоты кадров – 60 и 120 кадр/с, что дало возможность оценить влияние дискретизации видеоряда на точность временно́го совмещения и извлечения стереопар. При частоте 60 кадр/с интервал между соседними кадрами составляет 1/60 с, а при частоте 120 кадр/с – 1/120 с. При выборе ближайшего по времени кадра максимальная погрешность, обусловленная дискретностью видеоряда, составляет половину межкадрового интервала, то есть 1/120 с и 1/240 с соответственно. Движение съемочной системы относительно

плоскости тест-объекта задавалось со скоростью, соответствующей перемещению человека в медленном темпе, и принималось равным 0,61 м/с [46]. Дополнительно в ходе эксперимента выполнялись контролируемые наклоны стереосистемы относительно поверхности тест-объекта, имитирующие типичные изменения ориентации при ручной съемке в полевых условиях.

После проведения видеосъемки была выполнена синхронизация видеозаписей с левой и правой камер, затем из полученных материалов были извлечены изображения и сформированы стереопары. По полученному набору снимков было выполнено уравнивание блока снимков по методу связок. На данном этапе решалась обратная фотограмметрическая засечка: по опорным точкам тест-объекта с известными координатами в его системе определялись элементы внешнего ориентирования каждого снимка (рисунок 11). На основании полученных элементов внешнего ориентирования вычислялись фактические базисы фотографирования для каждой стереопары, а также СКП определения базиса. Для каждого варианта съемки было сформировано по 16 стереопар. Сводные результаты представлены в таблице 14 и приложении В.

Таблица 14 – СКП определения базиса фотографирования

№	FPS	B_{cc}, мм	$B_{\text{факт.}}$, мм	СКП, мм	Относительная ошибка
1	60	253	254,03	1,03	1/250
2	120		253,53	0,53	1/480

При этом установлено, что помимо погрешности временно́й синхронизации видеозаписей по звуковым сигналам необходимо учитывать рассогласование, обусловленное дискретностью видеоряда. Поскольку при формировании стереопары выбирается кадр, ближайший к расчётной временно́й отметке, максимальное дополнительное рассогласование составляет половину межкадрового интервала. Таким образом, при частоте 60 кадр/с его величина не превышает 1/120 с (0,0083 с), а при 120 кадр/с — 1/240 с (0,0042 с). Указанные значения не включают погрешность синхронизации видеозаписей по звуковому сигналу, оценённую отдельно.

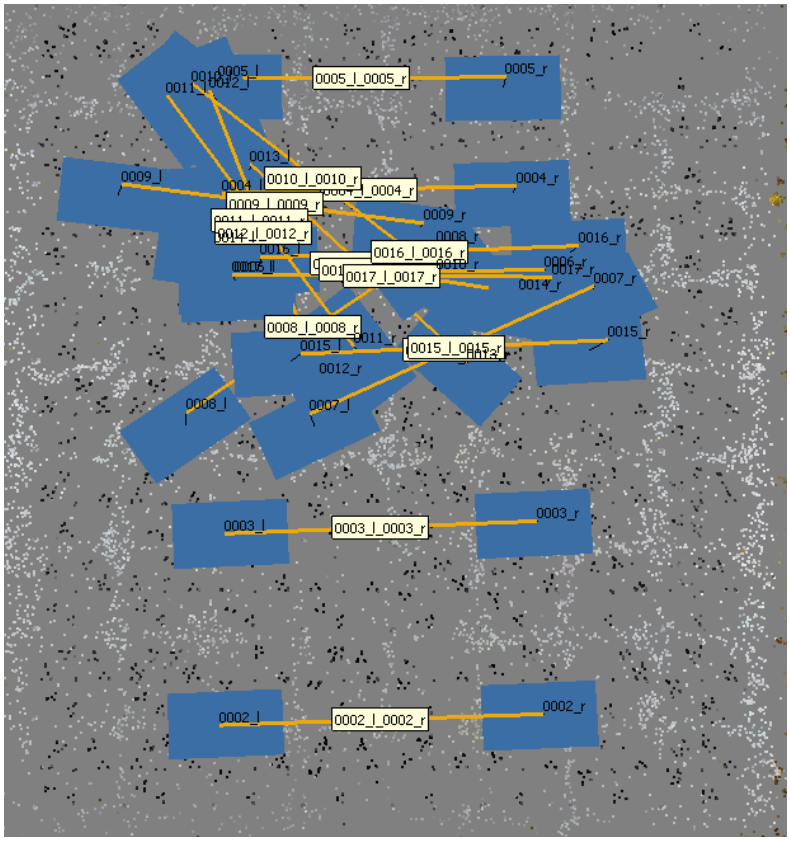


Рисунок 11 – Положение снимков после уравнивания блока фототриангуляции

Затем была проведена оценка измерительной способности стереосистемы с целью установить, с какой точностью по получаемой фотограмметрической модели возможно выполнять линейные измерения на объекте. Для этого была выполнена отдельная съемка плоского тест-объекта по методике, аналогичной эксперименту по оценке точности синхронизации стереопар (условия освещения, траектория и скорость перемещения, режимы частоты кадров). Отличие заключалось в схеме камеральной обработки при уравнивании блока фототриангуляции. В процессе фотограмметрической обработки было задано известное значение базиса фотографирования (расстояния между центрами проекций камер стереопары), что обеспечило определение масштаба фотограмметрической модели. После получения масштабированной модели на тест-объекте были выбраны 12 контрольных промеров (расстояний между маркированными точками). Эталонные значения этих расстояний были вычислены по исходным координатам марок в системе координат тест-объекта. Далее соответствующие расстояния были измерены по результатам уравнивания блока

фототриангуляции, масштабированного за счет заданного базиса фотографирования, а затем измеренные значения были сопоставлены с эталонными для оценки погрешности измерений (рисунок 12).

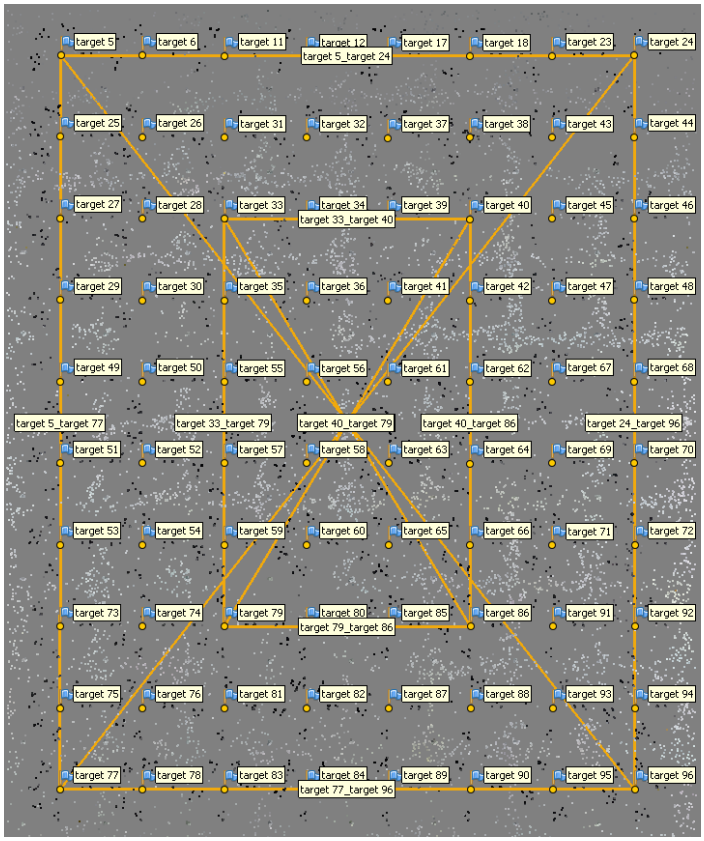


Рисунок 12 – Расположение контрольных промеров на тест-объекте

По результатам оценки измерительной способности стереосистемы установлено: при съемке с частотой 60 кадр/с СКП определения контрольных расстояний составила 3,81 мм, что соответствует относительной точности порядка 1/235. При увеличении частоты до 120 кадр/с СКП снизилась до 2,01 мм, а относительная точность составила около 1/450 [27]. Подробные результаты измерений и расчетов приведены в приложении Г.

Полученные значения показывают, что увеличение частоты кадров приводит к уменьшению погрешности измерений за счет более стабильного формирования стереопар при движении съемочной системы. На основании экспериментальных данных и принятого критерия практической применимости (обеспечение измерений по модели с точностью не хуже 15 мм) установлено: при частоте

60 кадр/с стереосистема обеспечивает требуемую точность при работе с объектами площадью порядка 3,5 × 3,5 м, тогда как при частоте 120 кадр/с область применимости расширяется до объектов размером около 6,7 × 6,7 м при сохранении заданного уровня точности [27].

2.5 Методика выполнения фотограмметрической съемки объектов археологического наследия с использованием разработанной стереосистемы

Для корректного применения стереосистемы необходимо определить основные требования к ее использованию в полевых условиях, обеспечивающие получение исходных материалов необходимого качества для последующего построения фотограмметрических моделей. Методика выполнения съемки включает подготовку объекта, выбор и установку параметров цифровых камер, выбор траекторий съемки и непосредственное выполнение съемки объекта.

Подготовка объекта. На этапе подготовки объекта необходимо определить его точные границы, в пределах которых будет выполняться съемка. Далее следует выделить ключевые элементы и участки, требующие более детальной фиксации (положение артефактов, выявленные стратиграфические слои и их границы). Объект необходимо расчистить от инструментов, листвы и иных материалов антропогенного и природного характера, которые снижают открытость и доступность фиксируемых фрагментов и могут искажать результаты съемки. В зоне съемки также следует разместить средства археологической фиксации: масштабную линейку, стрелку – указатель направления на север, а также табличку с наименованием объекта и датой проведения работ.

Дополнительно в зоне съемки следует разместить полевой тест-объект, включающий таблицу для оценки качества изображения, а также ОМОМ, предназначенный для уточнения масштаба и ориентирования модели. ОМОМ устанавливают на ровную поверхность таким образом, чтобы он не перекрывал элементы объекта археологического наследия. При необходимости выполняют его

горизонтирование с использованием подъемных винтов и ориентацию на север с применением компаса. При наличии геодезического оборудования рекомендуется определять координаты трех маркированных точек ОМОМ, что обеспечит привязку результатов съемки к внешней системе координат.

Обоснование выбора съемочных параметров. Важным аспектом настройки стереосистемы является обеспечение идентичности параметров работы двух камер, чтобы они выполняли запись в одинаковых условиях и с одинаковой интерпретацией сцены (яркость, цвет, угол обзора и т.п.). Камера GoPro HERO11 Black позволяет изменять следующие параметры видеозаписи [73].

1. *Частота кадров (FPS)* – количество кадров, записываемых за одну секунду. В практике съемки определяет плавность движения на видеозаписи и то, насколько подробно фиксируются быстрые изменения в кадре (при более высокой частоте движение выглядит более плавным). Повышение FPS улучшает временну́ю дискретизацию движения, что положительно влияет на точность синхронизации двух камер, что было обосновано в подразд. 2.4. Выбор частоты кадров зависит от линейных размеров снимаемого объекта.

2. *Разрешение видеозаписи* – размер кадра в пикселях, влияющий на разрешение получаемых изображений: чем выше разрешение, тем больше мелких элементов различимо, но тем больше объем файла и выше требования к носителю и обработке. При видеосъемке для решения фотограмметрических задач рекомендуется использовать наилучшее разрешение видеозаписи с учетом FPS. Обычно при увеличении разрешения видеозаписи снижается частота кадров с целью уменьшения данных для обработки процессором камеры.

3. *Светочувствительность (ISO)* – параметр усиления сигнала с матрицы камеры. При повышении ISO возрастает светочувствительность матрицы, но одновременно увеличивается шум (зернистость) и может снижаться детализация. На практике при съемке используют диапазон ISO от 100 до 400 при достаточном освещении (при его дефиците допускается повышение предела до 800).

4. *Настройки цифрового объектива (Digital Lens)* – выбор угла поля зрения и способа формирования изображения (например, широкоугольный режим или режим с коррекцией искажений). При съемке для решения задач в области фотограмметрии рекомендуется использовать линейный режим цифрового объектива, потому что он позволяет получить проекцию снимаемых объектов на плоскость сенсора с минимальными геометрическими искажениями. Кроме того, алгоритмам SfM/MVS проще и надежнее работать с изображениями, геометрические характеристики которых приближены к пинхол-камере [89, 97].

5. *Цифровая стабилизация (HyperSmooth/Horizon)* – программная компенсация дрожания и наклонов камеры. В практике съемки делает изображение более ровным и уменьшает тряску, но может сопровождаться кадрированием (обрезкой краев) и дополнительными программными преобразованиями изображения, которые осложняют процесс калибровки камеры и последующей фотограмметрической обработки. При съемке для задач фотограмметрии стабилизацию целесообразно отключать, чтобы избежать дополнительного кадрирования и цифровых преобразований изображения.

6. *Баланс белого (WB)* – настройка, отвечающая за цветопередачу при разном освещении (солнечный свет, тень, лампы). На практике влияет на общий оттенок изображения: от более теплого (желтоватого) до более холодного (синеватого). В случае выполнения вне лабораторных условий рекомендуется устанавливать баланс белого 5500K при дневном свете и 6000–6500K, когда тень/пасмурно. Использование автоматического баланса белого нежелательно, так как изменение баланса белого в ходе съемки не позволит впоследствии выполнить цветокоррекцию правильно.

7. *Выдержка (Shutter)* – время, в течение которого матрица экспонируется для формирования одного кадра. На практике определяет степень смаза изображения: длинная выдержка дает больше света, но увеличивает смаз, короткая – уменьшает смаз движения, но требует более яркого освещения или более высокой ISO. Выдержка должна обеспечивать величину смаза, не

превышающую 0,3 от пространственного разрешения [12]. В зависимости от условий съемки допустимая выдержка вычисляется по формуле 21:

$$t_{min} = \frac{0{,}3 \cdot GSD}{v}, \quad (21)$$

где GSD – требуемое пространственное разрешение съемки;

v – скорость движения оператора по объекту.

8. *Стандарт сжатия видеозаписи (кодек)* – способ компрессии видеопотока (например, H.264 или HEVC). Влияет на размер файлов и видимые артефакты сжатия: более эффективные кодеки позволяют получить меньший объем файла при сопоставимом качестве, но могут требовать более производительного оборудования для воспроизведения и монтажа. В камере GoPro HERO11 Black необходимо использовать кодек HEVC (H.265) с глубиной цвета 10 бит.

Рекомендованные параметры выполнения видеосъемки для задач документирования ОАН приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Рекомендованные параметры выполнения видеосъемки

№	Параметр	Значение
1	Частота кадров (FPS)	60–120 FPS
2	Разрешение видеозаписи	4–5.3K
3	Светочувствительность (ISO)	100–400 (800)
4	Настройки цифрового объектива (Digital Lens)	Линейный
5	Цифровая стабилизация	Отключена
6	Баланс белого (WB)	5500K – дневной свет; 6000–6500K – тень/пасмурно
7	Выдержка (Shutter)	$t_{min} = \frac{0{,}3 * GSD}{v}$
8	Стандарт сжатия видеозаписи (кодек)	HEVC (H.265) 10-bit

Процесс съемки. На качество исходного материала для построения фотограмметрической модели существенное влияние оказывают геометрия съемки, т.е. траектория перемещения относительно объекта, скорость движения оператора (во избежание смаза) и условия освещенности объекта съемки.

Условия освещенности объекта съемки. При выполнении съемки необходимо обязательно учитывать освещенность объекта, поскольку она

напрямую влияет на параметры экспозиции и качество получаемого изображения [55]. При недостатке света необходимо увеличивать как светочувствительность камеры, так и время выдержки, что приводит к увеличению шума на изображениях, а также смаза. Резкие перепады освещенности (глубокие тени, яркие участки, блики) вызывают неравномерность яркости и цветопередачи по поверхности объекта, что делает материал менее однородным и ухудшает последующие камеральные исследования. Для объектов, расположенных на открытой местности, съемку целесообразно выполнять либо в утренние и вечерние часы (при более мягком, равномерном освещении), либо в период, близкий к солнечному зениту, когда солнце находится высоко над горизонтом и освещает объект преимущественно сверху вниз. В этом случае тени от рельефа и элементов объекта минимальны, что снижает контраст и повышает равномерность освещения. Для объектов, расположенных в залесенной части, предпочтительны утренние или вечерние часы, поскольку в это время уменьшается вероятность появления бликов и пятнистых теней от кроны деревьев, негативно влияющих на качество изображения [72]. В обоих случаях благоприятным фактором является облачность, поскольку она рассеивает солнечный свет, снижает контраст и обеспечивает более равномерную освещенность объекта.

Скорость перемещения по объекту. При выполнении съемки скорость перемещения оператора относительно объекта не должна быть высокой. Движение следует осуществлять плавно и аккуратно, соблюдая требования сохранности: недопустимо наступать на участки с уязвимыми элементами и нарушать их положение, поскольку любые механические воздействия могут привести к повреждению или деформации элементов ОАН. Кроме того, скорость перемещения должна согласовываться с параметрами экспозиции, чтобы смаз изображения оставался в допустимых пределах: величина линейного смаза за время выдержки не должна превышать $0{,}3 \cdot GSD$. Выбор данного критерия обусловлен тем, что такой смаз остается субпиксельным (около 0,3 пикс.), практически не снижает резкость и не приводит к заметной деградации контуров и деталей снимаемого объекта [69]. Таким образом, темп движения выбирают исходя из выдержки и ожидаемой проекции

перемещения в плоскости объекта, обеспечивая получение резких и пригодных к последующей обработке изображений.

Геометрия съемки. Для построения моделей фотограмметрическими методами принципиально важно сформировать такую последовательность съемки, при которой каждый участок фиксируемой поверхности будет представлен на нескольких взаимно перекрывающихся изображениях. В связи с этим маршруты съемки должны обеспечивать непрерывное покрытие всей площади ОАН, достаточное перекрытие между соседними кадрами (или позициями съемки), а также минимизацию мертвых зон, особенно вблизи бровок, уступов и стенок раскопа [35].

При выполнении наземной фотограмметрической съемки применяются различные схемы построения съемочной сети, различающиеся расположением точек фотографирования и ориентацией оптических осей камеры. При конвергентной схеме точки съемки располагаются вокруг объекта, а оптические оси направляются к его центральной части [40, 55, 90]. Плановая маршрутная схема предусматривает последовательную съемку по параллельным маршрутам при ориентации камеры преимущественно по нормали к снимаемой поверхности [32, 55, 90]. При перспективной маршрутной схеме съемка выполняется с фиксированным углом наклона камеры по нескольким взаимно противоположным направлениям. Маршруты могут быть ориентированы как по сторонам света, например «север – юг», «юг – север», «запад – восток» и «восток – запад», так и относительно продольной и поперечной сторон исследуемого объекта [40, 79].

Основная съемочная сеть может дополняться отдельными снимками участков с недостаточным покрытием, включая зоны у бровок и стенок, углубления и другие труднодоступные элементы объекта [14, 51, 96]. Для документирования археологических объектов целесообразно применять перспективную маршрутную схему с последующей досъемкой недостаточно отображенных участков. Такая схема обеспечивает покрытие объекта с нескольких направлений, позволяет получить изображения горизонтальных и вертикальных поверхностей и сократить количество мертвых зон, возникающих вследствие сложной формы и неоднородности рельефа раскопа.

Ключевыми параметрами, подлежащими контролю при выполнении перспективной маршрутной съемки, являются продольный и поперечный базисы фотографирования, а также угол наклона камеры. Контроль угла наклона необходим для ограничения влияния разномасштабности по полю кадра, возникающей при перспективной съемке и способной ухудшать качество последующей обработки.

В разрабатываемой методике съемка выполняется с использованием стереосистемы, осуществляющей непрерывную видеозапись. В связи с этим контроль продольного базиса (расстояния между снимками одного маршрута) не является критичным на этапе полевых работ, поскольку требуемое расстояние между кадрами может быть задано позднее, при извлечении их из видеозаписи. Таким образом, при выполнении съемки первостепенное значение имеет определение поперечного базиса (расстояния между соседними маршрутами), а также оптимального угла наклона камеры в пределах выбранной схемы съемки. Общая схема маршрутной перспективной съемки приведена на рисунке 13.

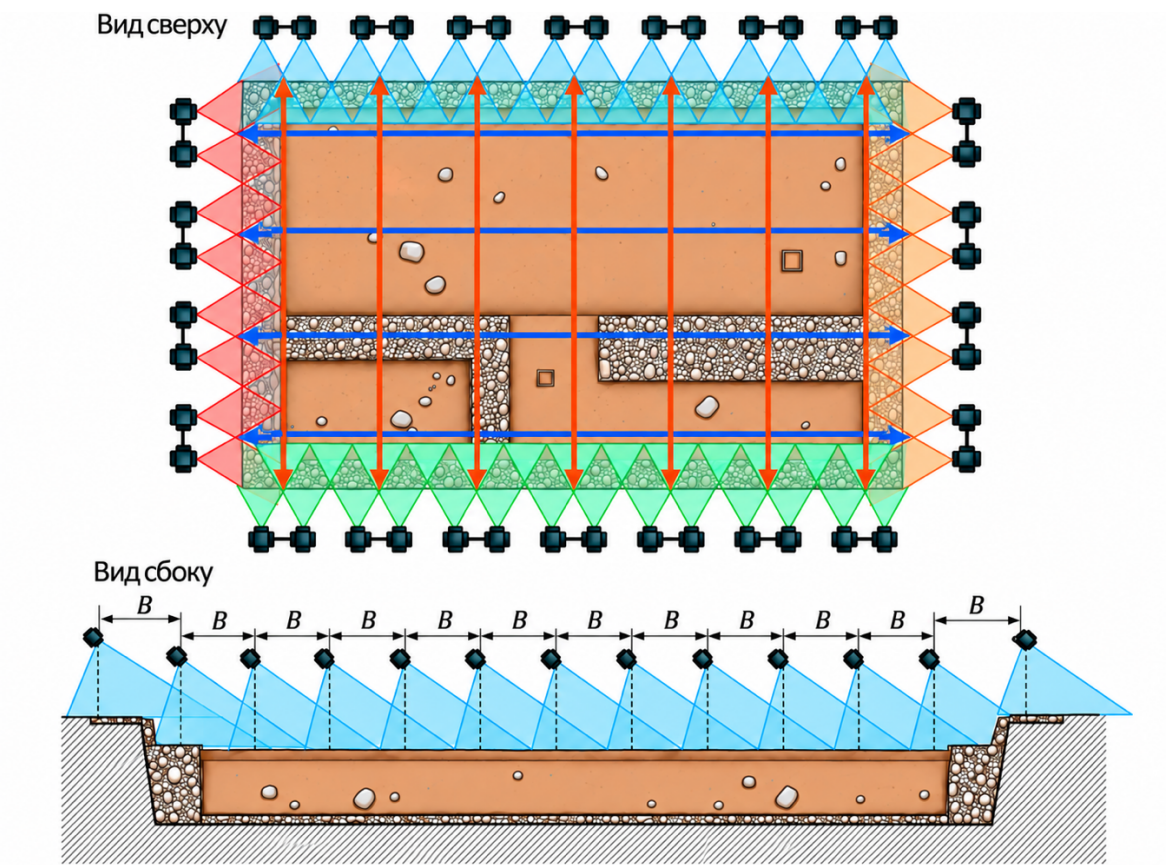


Рисунок 13 – Схема перспективной маршрутной съемки в четырех направлениях

Угол наклона оптической оси. При выполнении перспективной съемки рекомендуется задавать и поддерживать угол наклона оптической оси камеры относительно нормали к фиксируемой поверхности, поскольку именно этот параметр определяет характер перспективных искажений и разномасштабность по полю кадра (рисунок 14). При установлении допустимых углов наклона целесообразно использовать подходы, применяемые при съемке городской застройки для задач трехмерного моделирования. Это обусловлено тем, что при фиксации археологических объектов, как и в городской среде, выражены вертикальные и наклонные элементы (стенки и борта раскопа, уступы, углубления). В связи с этим для данного сценария съемки рекомендуется задавать угол наклона камеры от 30 до 45º [94, 95].

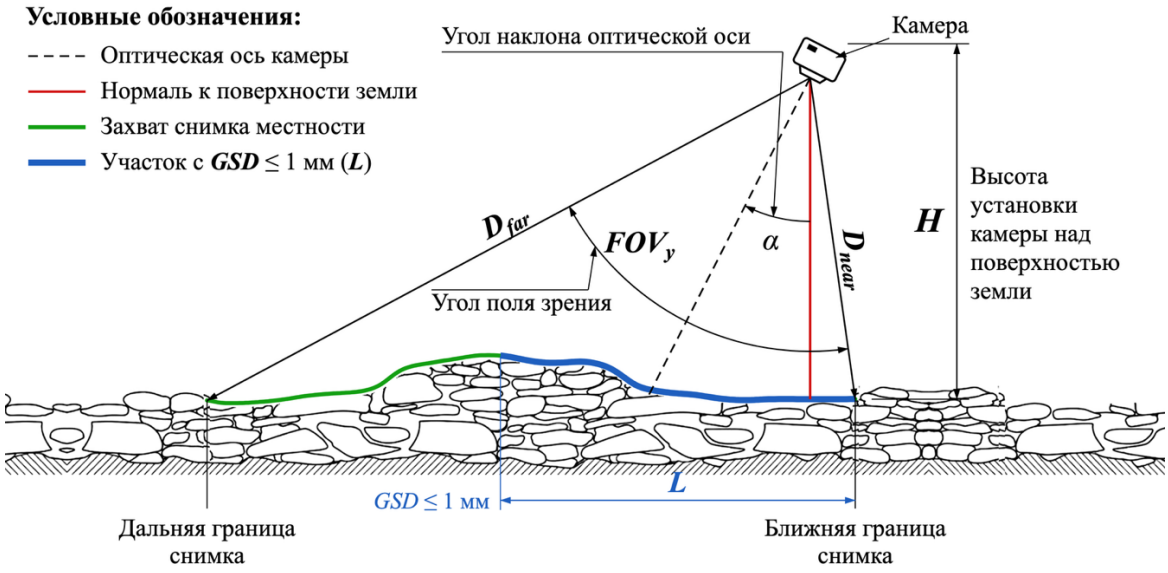


Рисунок 14 – Захват одиночного снимка при угле наклона 30º

В случае выполнения перспективной маршрутной съемки с углом наклона оптической оси от 30 до 45° расстояние от камеры до снимаемой поверхности изменяется по полю кадра. В результате ближняя и дальняя границы изображения формируются на различных расстояниях от центра проекции, обозначенных соответственно, как D_{near} и D_{far} (рисунок 14). При среднем росте человека 173 см и размещении съемочной системы на уровне груди высота камеры над снимаемой

поверхностью (H) может быть принята равной 1,5 м. При данных условиях расстояния D_{near} и D_{far} определяются по формулам 22 и 23:

$$D_{near} = \frac{H}{cos(\delta - \beta)} \quad (22)$$

$$D_{far} = \frac{H}{cos(\delta + \beta)}, \quad (23)$$

где H – высота камеры над поверхностью объекта (мм);

δ – угол наклона камеры относительно отвесной линии;

$\beta = \frac{FOV_y}{2}$ – угол поля зрения относительно короткой стороны матрицы.

Результаты вычисления расстояний до ближней и дальней границ изображения приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Расстояния до границ кадра при различных углах наклона камеры

№	Угол наклона оптической оси	D_{near}, м	D_{far}, м
1	30	1,50	3,55
2	45	1,52	8,64

Кроме того, при выборе угла наклона камеры необходимо учитывать изменение геометрии изображения при перспективной съемке. Вследствие наклона оптической оси проекция границ кадра на снимаемую поверхность приобретает форму трапеции, а расстояние от камеры до различных участков объекта изменяется по полю изображения. Это приводит к неравномерности пространственного разрешения и его снижению в наиболее удаленных частях кадра. Дополнительно на пространственное разрешение влияет выбранный режим видеосъемки: увеличение частоты кадров сопровождается уменьшением разрешения видеозаписи и, соответственно, увеличением эффективного размера пикселя. Расчет изменения пространственного разрешения по полю кадра выполнен по формуле 24, а полученные значения представлены в таблице 17.

$$GSD = \frac{D \cdot pxl}{f}, \quad (24)$$

где D– отстояние от объекта съемки (мм);

pxl – эффективный размер пикселя матрицы (мм);

f– фокусное расстояние (мм).

Таблица 17 – Пространственное разрешение на границах кадра при различных углах наклона камеры и режимах видеосъемки

№	Частота кадров, FPS	Размер пикселя, мкм	Угол наклона оптической оси	*GSD*, мм, при D_{near}	*GSD*, мм, при D_{far}
1	60	1,056	30	0,6	1,4
			45	0,6	3,4
2	120	1,461	30	0,8	1,9
			45	0,8	4,6

Интервал извлечения изображений из видеозаписей. Как было отмечено ранее, требуемое продольное перекрытие последовательных стереопар может быть обеспечено путем выбора соответствующего интервала извлечения синхронизированных кадров из видеопотока. При этом необходимо учитывать следующие параметры: пространственное разрешение должно быть не хуже 1 мм/пикс., что обеспечивает возможность идентификации и классификации формы элементов объектов археологического наследия размером 10 мм и более. Продольное перекрытие рабочих зон (областей снимка с пространственным разрешением до 1 мм) последовательных стереопар должно составлять не менее 60 %. Непосредственно в процессе видеосъемки контролировать данный параметр не требуется, поскольку необходимое продольное перекрытие может быть обеспечено на этапе формирования стереопар путем задания соответствующего интервала извлечения синхронизированных кадров из видеопотока.

Для определения данного интервала была рассчитана протяженность рабочей зоны кадра, в пределах которой пространственное разрешение не превышает 1 мм/пикс. Предельное наклонное расстояние, при котором пространственное разрешение достигает значения $GSD_{lim} = 1\text{мм/пикс.}$, определяется по формуле 25:

$$D_{lim} = \frac{GSD_{lim} \cdot f}{pxl}, \quad (25)$$

где GSD_{lim} – предельное пространственное разрешение (мм);

pxl – эффективный размер пикселя матрицы (мм);

f – фокусное расстояние (мм).

Горизонтальное проложение от точки надира до границы зоны с требуемым пространственным разрешением рассчитывается по формуле 26:

$$l_{1\text{ мм}} = \sqrt{D_{lim}^2 - H^2}, \quad (26)$$

где H – высота камеры над снимаемой поверхностью (мм);

D_{lim}– предельное отстояние от объекта съемки (мм).

Положение ближней границы кадра и протяженность его рабочей зоны определяются соответственно по формулам 27 и 28:

$$l_{near} = H \cdot \tan(\alpha - \beta) \quad (27)$$

$$L_{1\text{ мм}} = l_{1\text{ мм}} - l_{near}, \quad (28)$$

где $\beta = \frac{FOV_y}{2}$ – угол поля зрения относительно короткой стороны матрицы;

H – высота камеры над снимаемой поверхностью (мм);

α – угол наклона оптической оси относительно отвесной линии.

С учетом требуемого продольного перекрытия P = 60 % продольный базис фотографирования определяется по формуле 29:

$$B_x = L_{1\text{ мм}} \cdot \left(1 - \frac{P_x}{100}\right), \quad (29)$$

где P_x– продольное перекрытие снимков (%);

$L_{1\text{ мм}}$ – протяжённость рабочей зоны кадра, в пределах которой пространственное разрешение не превышает предельного (мм).

Временно́й интервал и количество кадров между извлекаемыми стереопарами при средней скорости движения съемочной системы V = 0,61 м/с рассчитываются по формуле 30. Результаты расчетов представлены в таблице 18.

$$n = FPS \cdot t, \tag{30}$$

где FPS – частота кадров в секунду;

$t = \frac{B_x}{V}$ – время прохождения базиса фотографирования (с)

V – скорость движения съемочной системы.

Таблица 18 – Расчет параметров формирования стереопар при перспективной маршрутной съемке

№	Угол наклона оптической оси, °	Режим видеосъемки	L_1 мм, м	B_x, м	$\Delta t, c$	Интервал извлечения кадров
1	30	5,3K, 60 кадр/с	2,21	0,89	1,45	85
2		4K, 120 кадр/с	1,22	0,49	0,80	95
3	45	5,3K, 60 кадр/с	1,82	0,73	1,19	70
4		4K, 120 кадр/с	0,83	0,33	0,54	65

Расчет показал, что увеличение угла наклона камеры и эффективного размера пикселя приводит к сокращению рабочей зоны кадра и уменьшению допустимого интервала извлечения кадров. Полученные значения следует учитывать при формировании стереопар в зависимости от выбранного угла наклона камеры и режима видеосъемки, что обеспечивает требуемое пространственное разрешение и продольное перекрытие не менее 60 %.

Определение поперечного (межмаршрутного) базиса. После формулирования требований к углам наклона камеры и выбора интервала извлечения стереопар был определен поперечный базис. Расстояние между маршрутами следует рассчитывать исходя из рекомендуемого поперечного перекрытия снимков (60 %) при выполнении наземной фотограмметрической съемки с последующей обработкой методами SfM/MVS [96]. Так как при выполнении перспективной съемки проекция кадра на поверхность объекта приобретает форму трапеции, расчет межмаршрутного базиса наиболее корректно выполнять относительно ближней границы кадра, поскольку при перспективной

съемке ширина полосы захвата снимка в ближней зоне минимальна. Следовательно, именно здесь при заданном базисе между маршрутами должно обеспечиваться требуемое перекрытие 60 %. По мере удаления от камеры ширина полосы захвата снимка местности увеличивается, поэтому фактическое перекрытие, как правило, возрастает. Расчет минимального базиса выполнялся по формуле 31:

$$B_y = 2D_{near} \cdot tg\left(\frac{FOV_x}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{P_y}{100}\right), \quad (31)$$

где $\mathrm{FOV_x}$ – угол поля зрения относительно длинной стороны матрицы;

$\mathrm{D_{near}}$ – отстояние от объекта в ближней зоне кадра (мм);

$\mathrm{P_y}$ – требуемое поперечное перекрытие (60%).

Значения минимальных поперечных базисов для обеспечения перекрытия 60 % при различных углах наклона оптической оси цифровой фотокамеры приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Влияние угла наклона на базис фотографирования и перекрытие

№	Угол наклона, °	D_{near}, м	D_{far}, м	B_y, м, при D_{near}	P_y, %, при D_{far}
1	30	1,50	3,55	1,49	83
2	45	1,52	8,64	1,52	92

Требования к дополнительной съемке. Объекты археологического наследия нередко характеризуются сложной пространственной геометрией: выступающими элементами кладки и конструкций, деформациями и смещениями фрагментов вследствие разрушений, а также частично скрытым или заглубленным положением отдельных находок. Указанные особенности приводят к возникновению мертвых зон, когда отдельные участки объекта формально попадают в поле зрения камеры, однако оказываются перекрытыми другими элементами рельефа или конструкции и, следовательно, не фиксируются на изображениях в явном виде.

Для уменьшения влияния мертвых зон и обеспечения полноты исходного материала применяется дополнительная съемка недостающих участков – целенаправленная съемка участков с недостаточным покрытием. Дополнительная съемка выполняется после основной серии по результатам визуальной оценки

объекта и/или контроля полученного материала и заключается в съемке проблемных зон с иных точек и ракурсов, обеспечивающей возможность их многократного определения как минимум на стереопаре снимков. В результате уменьшается количество элементов объекта, не представленных на изображениях. Таким образом, дополнительная съемка позволяет повысить полноту данных о поверхности ОАН и сократить число мертвых зон при последующей фотограмметрической обработке и выполнении измерений по фотограмметрической модели.

При выполнении дополнительной съемки необходимо контролировать два ключевых фактора: масштаб (пространственное разрешение) и сохранение перекрытий с изображениями, полученными при маршрутной перспективной съемке. Существенное расхождение в масштабе между сериями затрудняет совместную обработку: экспериментальные данные показывают, что для устойчивого совмещения изображений разница масштабов не должна превышать шесть раз [65]. В условиях перспективной съемки разномасштабность по полю кадра возрастает и при угле наклона 45° может достигать около 5,6 раза, однако при принятом рабочем диапазоне расстояний установки стереосистемы 0,5–2,5 м GSD в пределах всей серии различается не более чем в пять раз, что укладывается в указанные рамки.

Для обеспечения перекрытий и связности дополнительной серии съемки с основной рекомендуется начинать дополнительную съемку с позиций, максимально близких к положению оператора при выполнении маршрутной перспективной съемки. Так можно сформировать переходные кадры с сопоставимым масштабом и ракурсом. После этого выполняют дополнительную съемку проблемных участков, изменяя позицию съемки таким образом, чтобы ранее закрытые элементы фиксировались на нескольких кадрах. Такой порядок позволяет одновременно сохранить требуемую связность между сериями и устранить пропуски покрытия за счет дополнительного ракурса.

На основании изложенных положений сформирована общая технологическая схема выполнения фотограмметрической съемки объектов

археологического наследия с использованием разработанной стереосистемы (приложение Д).

Выводы по разделу 2

1. Разработан опытный образец стереосистемы с фиксированным базисом для выполнения видеосъемки объектов археологического наследия с использованием двух экшн-камер. Обоснован выбор съемочного оборудования, выполнен предварительный расчет параметров системы, осуществлена ее калибровка, включающая определение элементов внутреннего ориентирования камер, а также установлен фактический базис стереосистемы.

2. Реализован алгоритм синхронизации двух видеозаписей по звуковой дорожке. В соответствии с ним разработано программное обеспечение для синхронизации видеопотоков, извлечения стереопар из видеозаписей в совокупности с данными телеметрии, включая GPS-координаты центров фотографирования. Разработанное программное обеспечение зарегистрировано в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатенте) (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693254).

3. Разработана методика выполнения съемки объектов археологического наследия с использованием стереосистемы с фиксированным базисом, а также реализована фотограмметрическая обработка полученных данных, результатом которой стала ориентированная фотограмметрическая модель объекта.

РАЗДЕЛ 3. АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ

Полевая апробация методики съемки с использованием опытного образца стереосистемы представляет собой завершающий этап проверки разработанной методики для подтверждения ее работоспособности на реальных объектах археологического наследия. В данном разделе рассматривается применение фотограмметрической видеосъемки с фиксированным базисом в условиях реального проведения археологических работ. Целью апробации является получение измеряемых фотограмметрических моделей, пригодных для дальнейшего камерального анализа и подготовки отчетных материалов. Апробация включает экспериментальную съемку выбранных объектов, последующую фотограмметрическую обработку видеоматериалов и оценку соответствия полученных результатов заданным требованиям к качеству.

3.1 Экспериментальная апробация разработанной методики фотограмметрической съемки на контрольном археологическом объекте

Для экспериментальной апробации методики был создан контрольный полигон, обеспечивающий возможность объективной оценки характеристик как стереосистемы, так и методики выполнения съемки. Одним из определяющих условий являлась оперативная доступность объекта, поэтому рассматривались площадки, расположенные в г. Москве или Московской области. В рамках сотрудничества с ИА РАН в качестве контрольного полигона был выбран объект (рисунок 15), расположенный в г. Москве (ЦАО, район станции метро «Третьяковская»). Работы на площадке выполнялись в составе археологических изысканий перед началом строительства. Площадь исследуемого участка составила 70 м².



Рисунок 15 – Общий вид контрольного полигона

Перед началом работ площадка была обеспечена пунктами съемочного обоснования. В качестве опорных точек использовались кодированные маркеры, закрепленные на пластиковых колышках, оснащенных горизонтальной площадкой (рисунок 16), что обеспечивало устойчивую установку в грунт и удобство последующей фиксации маркеров на фотоснимках.



а) б)

Рисунок 16 – Закрепление опорных точек с помощью кодированных маркеров: а) закрепленная опорная точка на объекте; б) конструкция опорной точки

Затем опорные точки были размещены равномерно по площади контрольного полигона. Для повышения достоверности оценки точности формируемой фотограмметрической модели маркеры устанавливались не только на уровне текущей поверхности раскопа (по достижении исследуемого стратиграфического горизонта), но и на бортах раскопа. Такое размещение обеспечивало расположение опорных и контрольных точек на различных высотах, что позволило оценить пространственное распределение ошибок и выявить возможные различия точности по горизонтальной и вертикальной составляющим. Посредством размещения маркеров была сформирована контролируемая опорная сеть, необходимая для внешнего ориентирования, масштабирования и последующего контроля результатов фотограмметрической обработки. Всего на площадке было установлено 11 маркеров, координаты которых определены электронным тахеометром в единой системе координат объекта. Схема размещения маркеров приведена на рисунке 17.



Рисунок 17 – Схема расположения опорных точек

Дополнительно были размещены тест-объекты, используемые в методике документирования ОАН: ОМОМ и панель контроля качества изображений.

После подготовки контрольного полигона была выполнена перспективная маршрутная съемка участка раскопа под углом наклона оптической оси 30° с дополнительной досъемкой конструктивных элементов фундамента, расположенных в его угловой части. Экспериментальная съемка проводилась двумя сериями, соответствующими частоте 60 и 120 кадр/с, по схеме и параметрам, предложенным в подразд. 2.5. По результатам съемки было получено четыре видеофайла: два с левой и правой камер с частотой 60 кадр/с и два с левой и правой камер с частотой 120 кадр/с. Средняя длительность видеофайлов составила 4 мин 5 с.

В процессе камеральной обработки материалов съемки на первом этапе была выполнена синхронизация видеозаписей по звуковой дорожке с левой и правой камер для каждой серии. Точность синхронизации камер, оцененная по осциллограмме аудиосигнала, для съемки при частоте 60 кадр/с составила 0,007 с, а для съемки при частоте 120 кадр/с – 0,004 с. В результате синхронизации было получено по две синхронизированные видеозаписи (левая и правая камеры) для каждой из серий съемки.

На следующем этапе было выполнено извлечение изображений из видеозаписей левой и правой камер с временны́м шагом 1 кадр/с. При сохранении результатов автоматически формировались каталоги left_camera и right_camera, содержащие изображения соответствующих каналов. Файлы именовались по единому шаблону: «порядковый номер_индекс камеры» (например, 0001_l.png и 0001_r.png), что обеспечило однозначное соответствие кадров внутри стереопары и исключило ошибки сопоставления на последующих этапах обработки. В результате для серии съемки с частотой 60 кадр/с была сформирована 231 стереопара, а для серии с частотой 120 кадр/с – 258 стереопар.

По полученным изображениям с панелью контроля качества (рисунок 18) была произведена оценка разрешающей способности по радиальной мире, пространственного разрешения, а также возможности дешифрирования объектов с различным относительным контрастом для каждой съемочной серии.

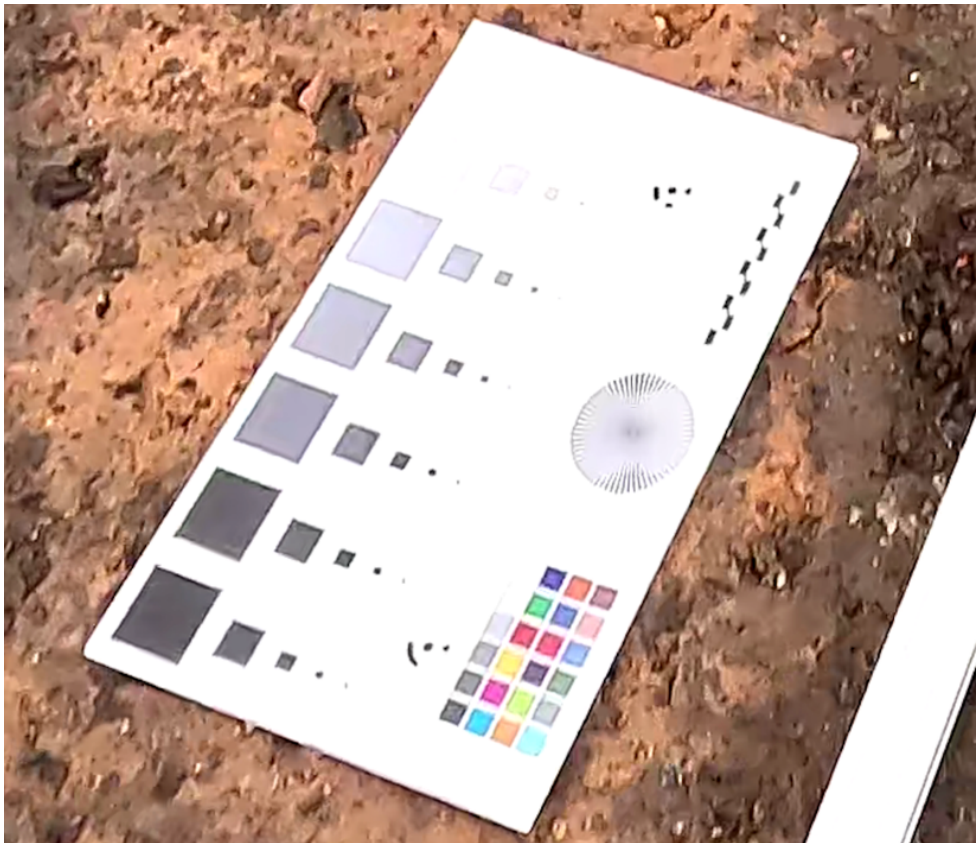


Рисунок 18 – Панель контроля качества изображений, размещенная на объекте апробации

1. Выполнена оценка разрешающей способности съемочной системы и предельной частоты Найквиста по формулам 32–33:

$$R_{\text{с}} = \frac{N_{\text{м}}}{\pi \cdot d_{\text{кр.н}}}, \tag{32}$$

где $N_{\text{м}}$ – количество пар штрихов на радиальной мире (64);

$$d_{\text{кр.н}} = pxl \cdot d_{\text{кр.н}}(\text{пикс.})$$

$$R_{Nyq} = \frac{1}{2 \cdot pxl}, \tag{33}$$

где pxl – эффективный размер пикселя матрицы.

2. Определена расчетная минимальная ширина различимого контрастного элемента на предельной рабочей дистанции стереосистемы. Расчет выполнен на основании экспериментально установленной разрешающей способности камеры по формуле 34:

$$A = \frac{D_{far}}{2R_c \cdot f}, \quad (34)$$

где D_{far}– предельное расстояние работы съемочной системы;

R_c – разрешающая способность съемочной системы;

f – фокусное расстояние.

3. Экспериментально определено пространственное разрешение изображения путем измерения расстояний между центрами кодированных маркеров на объекте и на изображении. Расчет выполнен по формуле 35:

$$GSD = \frac{L}{l}, \quad (35)$$

где L – фактическое расстояние между центрами кодированных маркеров, мм;

l – расстояние между центрами этих же маркеров на изображении, пикс.

4. Оценена точность цветопередачи камеры по изображениям цветовой мишени с использованием показателя цветового различия CIEDE2000 ΔE^*_{00}. Расчет выполнен с помощью специализированного онлайн-калькулятора «Разности цветов» путем сопоставления эталонных значений цветовых полей мишени с полученными по их изображениям. По величине ΔE^*_{00} определена степень отклонения зарегистрированных камерой цветов от эталонных: чем меньше значение показателя, тем выше точность цветопередачи.

Все результаты оценки качества изображений приведены в таблице 20.

Таблица 20 – Оценка качества изображений

№	Режим съемки	D_{far}, м	R_c, линий/мм	R_{Nyq}, линий/мм	A, мм	GSD, мм	ΔE^*_{00}
1	5,3K, 60 кадр/с	2,5	338	473	1,36	0,9	15,1
2	4K, 120 кадр/с	2,0	244	342	1,51	1,0	14,7

Дополнительно рассмотрена возможность идентификации тест-объектов, имеющих различные линейные размеры и уровни относительного контраста. По полученным изображениям установлено, для каких тест-объектов возможно достоверно определить их наличие, контур, форму и пространственную

ориентацию. Тест-объект считался идентифицируемым при условии уверенного распознавания его основных геометрических признаков.

При оценке дешифрируемости тест-объектов с различным относительным контрастом установлено, что различимыми являются первые пять из семи уровней контраста, где первому уровню соответствует наиболее темный, а седьмому – наиболее светлый тест-объект. Анализ тестовой панели показал, что для объектов с уровнями относительного контраста от первого до пятого отчетливо определяется геометрическая форма элементов размером 10 × 10 мм. Элементы размером 5 × 5 мм также обнаруживаются на изображении, однако достоверно определить их форму невозможно.

Полученные результаты подтвердили обоснованность принятого требования к пространственному разрешению изображений: для идентификации тест-объектов размером 10 × 10 мм и определения их геометрической формы необходимо обеспечить пространственное разрешение не хуже 1 мм/пикс. При таком разрешении линейный размер объекта отображается приблизительно 10 пикселями, что обеспечивает передачу его основных геометрических признаков.

После подготовки и оценки качества изображений была выполнена фотограмметрическая обработка материалов съемки в ЦФС Agisoft Metashape Professional. Сформированные стереопары были импортированы в проект, после чего изображения были распределены на две группы, соответствующие левой и правой камерам. Для каждой группы были заданы параметры калибровки, полученные в лабораторных условиях, а также введены исходные значения фокусного расстояния и эффективного размера пикселя. Далее был применен разработанный программный модуль автоматизации создания масштабных линеек, который перед этапом уравнивания позволял задать известный базис фотографирования для каждой пары снимков (рисунок 19). После задания базиса было выполнено уравнивание блока фототриангуляции методом связок, в результате были получены элементы внешнего ориентирования снимков и сформировано облако связующих точек.

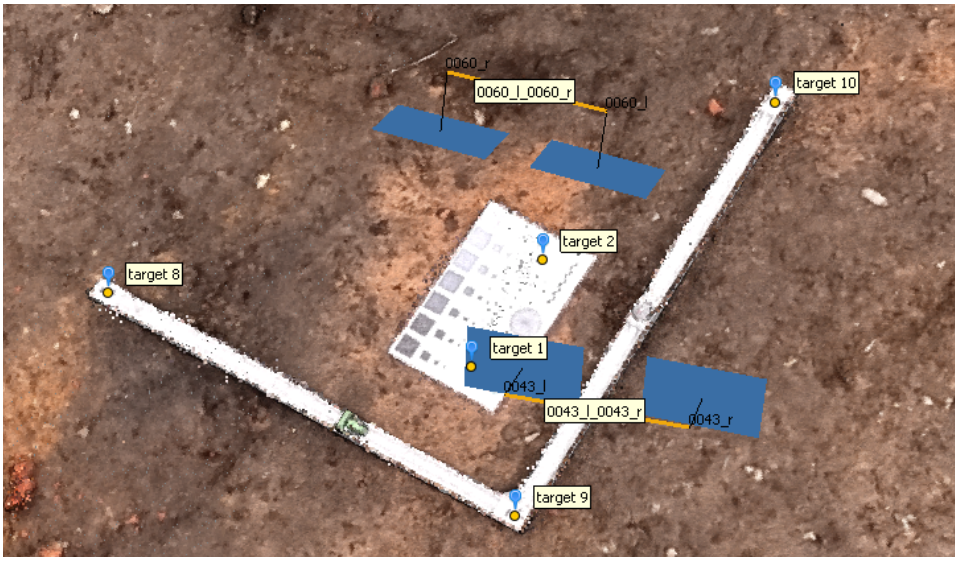


Рисунок 19 – Заданные базисы между снимками на фоне плотного облака точек

На этапе оценки точности были проверены геометрические характеристики сформированной фотограмметрической модели по контрольным промерам для каждой серии съемки. Было выполнено 18 контрольных измерений в различных плоскостях с целью анализа пространственного распределения погрешностей. Эталонные значения промеров определялись расчетом расстояний между точками, которые были закреплены на местности с использованием кодированных маркеров и координаты которых были получены с использованием электронного тахеометра. Схема расположения контрольных промеров приведена на рисунке 20.

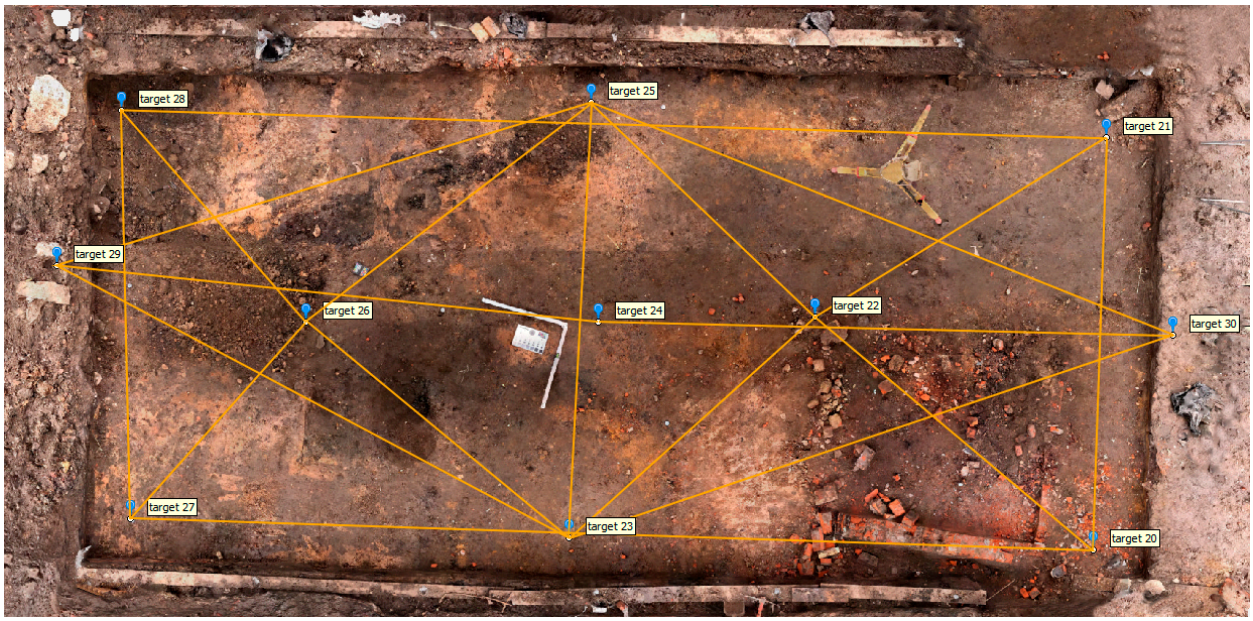


Рисунок 20 – Схема расположения контрольных промеров на объекте ОАН

По результатам оценки точности установлено, что при съемке с частотой 60 кадр/с СКП контрольных промеров составила 27 мм, а относительная ошибка – 1/228. При увеличении частоты съемки до 120 кадр/с СКП снизилась до 15 мм, а относительная ошибка составила 1/394.

Для определения допустимого линейного размера документируемого объекта использовано соотношение 36:

$$L_{\text{доп}} = N \cdot m_{\text{доп}}\,, \tag{36}$$

где $L_{\text{доп}}$ – допустимая длина измеряемого элемента;

N – знаменатель относительной ошибки;

$m_{\text{доп}}$ – допустимая средняя квадратическая погрешность, принятая равной 15 мм.

При допустимой абсолютной ошибке измерений 15 мм полученные значения относительной точности соответствуют предельной длине измеряемого отрезка около 3,5 м для режима 60 кадр/с и около 6 м для режима 120 кадр/с. Данный расчет выполнен при условии сохранения установленной относительной точности и характеризует допустимые линейные размеры элементов, а не предельную площадь документируемого объекта. Подробные результаты оценки точности приведены в приложении Е.

Затем был проанализирован подход к угловому ориентированию фотограмметрической модели и уточнению ее масштаба с использованием ОМОМ по трем опорным точкам. За исходные данные принималось, что опорные точки ОМОМ расположены в одной плоскости, расстояния между ними известны, а одна из сторон модуля ориентирована на север. Это позволило уточнить масштаб фотограмметрической модели и определить угловые элементы внешнего ориентирования в локальной системе координат. С этой целью был подготовлен программный модуль для ЦФС Agisoft Metashape Professional с пользовательским интерфейсом (рисунок 21).

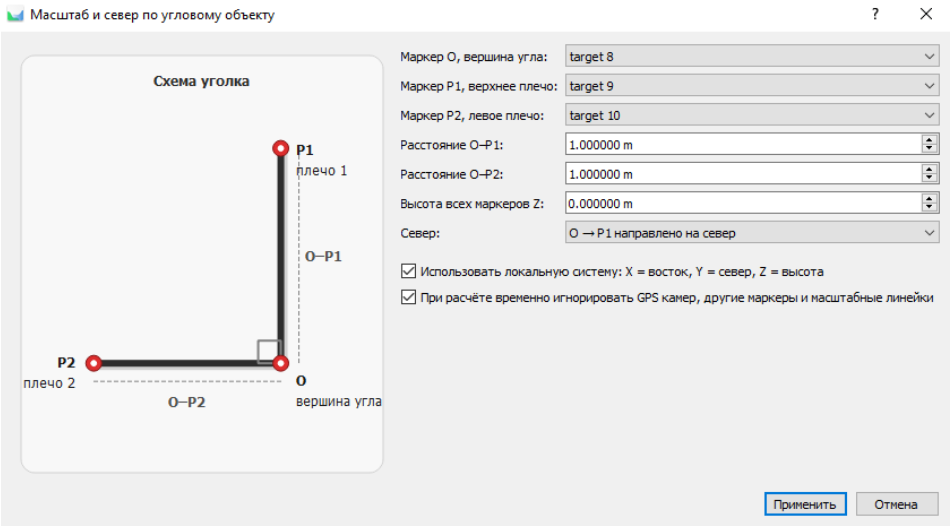


Рисунок 21 – Интерфейс программного модуля ориентирования и масштабирования фотограмметрической модели

Программный модуль позволяет в процессе работы указать три опорных точки на вершинах ОМОМ, задать известные расстояния между ними, высоту опорных точек и направление одной из сторон модуля на север. На основании этих данных программный модуль назначает выбранным маркерам координаты в локальной метрической системе, где ось X соответствует восточному направлению, ось Y – северному, а ось Z – высоте, после чего выполняет пересчет параметров уравнивания блока. В результате фотограмметрическая модель получает заданный масштаб и угловую ориентацию, что позволяет использовать ее как основу для последующих измерений, анализа и построения производных фотограмметрических материалов.

По результатам ориентирования фотограмметрической модели и масштабирования была оценена точность. Масштабирование фотограмметрической модели позволило повысить точность первоначальных измерений. В результате использования ОМОМ при съемке с частотой 60 кадр/с СКП по контрольным промерам составила 5,2 мм при относительной ошибке 1/1240. При увеличении частоты съемки до 120 кадр/с СКП по контрольным промерам снизилась до 3,8 мм, а относительная ошибка составила 1/1516. Благодаря увеличению точности был расширен диапазон использования стереосистемы для документирования ОАН с линейным размером до 18 м при

частоте 60 кадр/с и до 23 м при частоте 120 кадр/с. Подробная оценка точности приведена в приложении Ж. Определение угловых элементов внешнего ориентирования фотограмметрической модели позволило устранить произвольное положение уравненного блока в локальной системе координат, задать направление его осей в соответствии с направлением осей системы координат объекта и обеспечить корректное построение ортофотопланов в требуемых плоскостях проецирования. Обобщенные результаты исследования применимости стереосистемы при использовании различных способов определения масштабного коэффициента фотограмметрической модели представлены в таблице 21.

Таблица 21 – Предельные размеры объектов съемки в зависимости от способа определения масштабного коэффициента модели

№	Алгоритм		Максимально допустимый размер ОАН, м
1	Частота кадров	60 кадр/с	3,5 × 3,5
	Определение масштабного коэффициента	Базис фотографирования стереосистемы	
2	Частота кадров	60 кадр/с	18 × 18
	Определение масштабного коэффициента	Базис фотографирования стереосистемы и уточнение с помощью ОМОМ	
3	Частота кадров	120 кадр/с	6 × 6
	Определение масштабного коэффициента	Базис фотографирования стереосистемы	
4	Частота кадров	120 кадр/с	23 × 23
	Определение масштабного коэффициента	Базис фотографирования стереосистемы и уточнение с помощью ОМОМ	

3.2 Апробация разработанной методики в рамках Новороссийской археологической экспедиции

Апробация стереосистемы и разработанной методики съемки проводилась в рамках Новороссийской археологической экспедиции ИА РАН, в работе которой

автор участвует с 2015 г., выполняя аэрофотогеодезическое сопровождение археологических исследований с использованием современных методов документирования объектов археологического наследия. Результаты совместных исследований представлены в коллективной монографии «Синдика: история, археология, антропогенные ландшафты» [26].

В рамках Новороссийской археологической экспедиции была выполнена съемка (рисунок 22) шести объектов, различающихся по степени сложности, типу, площади и характеру местности. Работы проводились как на открытых участках, так и на залесенной территории.



Рисунок 22 – Процесс выполнения съемки на объекте «Раевское городище»

Апробация проводилась на следующих объектах.

1. Родники – погребальный комплекс, расположенный в Краснодарском крае, северо-западнее станицы Натухаевской [24]. Объект находится на залесенной территории. В его пределах была выполнена съемка четырех участков площадью от 18 до 60 м², размеры участков по сторонам приведены в таблице 22.

Таблица 22 – Размеры объектов на участке «Родники»

№	Объект	Размер, м
1	1	6 × 5
2	2	6 × 5
3	3	11 × 8
4	4	5 × 5

2. Раевское городище – фрагменты цитадели крепости, расположенные в Краснодарском крае, западнее станицы Раевской. Объект находится на открытой местности. Площадь съемки составила около 250 м². Размер объекта 22 × 11 м.

3. Башня Лиманчик – сооружение башенного типа, расположенное в Краснодарском крае, южнее села Абрау-Дюрсо. Объект находится на открытой местности. Площадь съемки составила около 170 м². Размер объекта 13 × 13 м.

Перед проведением съемочных работ объекты были подготовлены. Была зачищена поверхность от посторонних предметов, осыпавшегося грунта и листвы, затрудняющих фиксацию элементов объекта и последующую фотограмметрическую обработку. На объектах были размещены обязательные атрибуты археологической фиксации: информационная табличка с наименованием, стрелка – указатель направления на север, а также масштабная линейка, роль которой выполняла нивелирная рейка. Дополнительно на каждом объекте был установлен ОМОМ, ориентированный на север и приведенный в горизонтальное положение. С использованием нивелира высотная отметка была перенесена с репера на угол ОМОМ. Благодаря этому впоследствии стало возможным определение уровенной поверхности фотограмметрической модели в системе высот, применяемой при проведении археологических работ на объекте археологического наследия.

В процессе полевых работ была выполнена съемка всех шести объектов. Выбор параметров съемки и схемы фотограмметрической обработки определялся размерами каждого исследуемого объекта. Для Родников была выполнена видеосъемка с разрешением 5,3K и частотой 60 кадр/с, для Раевского городища – с разрешением 4K и частотой 120 кадр/с, для Лиманчика – с разрешением 5,3K и

частотой 60 кадр/с. На всех объектах осуществлялась перспективная маршрутная съемка под углом 30° с дополнительной съемкой в мертвых зонах.

Наряду со съемкой с использованием стереосистемы выполнялась классическая фотограмметрическая съемка, основанная на последовательном фотографировании ОАН. Это позволило сопоставить оба подхода и оценить, насколько применение стереосистемы повышает оперативность и эффективность полевого документирования. Кроме того, для двух объектов погребального комплекса Родники съемка с использованием стереосистемы была выполнена непосредственно археологами, что позволило оценить возможность применения предложенной методики специалистами без профильной фотограмметрической подготовки.

После завершения съемки выполнена синхронизация видеозаписей, полученных двумя камерами. Точность синхронизации оценена по осциллограммам аудиосигналов. Среднее временно́е рассогласование видеозаписей по результатам съемки шести объектов составило 0,005 с. После синхронизации из видеопотоков извлечены соответствующие стереопары, которые затем были подготовлены для фотограмметрической обработки.

На этапе фотограмметрической обработки для каждой камеры были загружены параметры калибровки. С использованием разработанного программного модуля для каждой стереопары автоматически задавалась величина базиса фотографирования, после чего выполнялось уравнивание блока фототриангуляции методом связок. По завершении уравнивания был уточнен масштабный коэффициент модели по кодированным маркерам, расположенным на ОМОМ. Затем модель была ориентирована на север и приведена к системе высот объекта археологического наследия.

По контрольным промерам выполнена оценка точности полученных фотограмметрических моделей объектов археологического наследия. В качестве показателей точности использованы средняя квадратическая и относительная погрешности измерений. Совместное применение данных показателей обусловлено различием линейных размеров исследованных объектов более чем в три раза. Для более протяженных объектов использовались контрольные отрезки

большей длины, что приводило к увеличению абсолютных значений погрешностей и СКП. Поэтому оценка только по СКП не позволяет в полной мере сопоставить результаты, полученные для объектов различного размера.

Вместе с тем относительная погрешность измерений оставалась сопоставимой для всех исследованных объектов. Это подтверждает работоспособность предлагаемой методики и воспроизводимость результатов ее применения независимо от размеров снимаемого объекта.

Дополнительно по панели контроля качества изображений выполнена экспериментальная оценка пространственного разрешения. Для этого сопоставлены фактическое расстояние между центрами кодированных маркеров на объекте и расстояние между ними на изображении.

По результатам проведенной оценки установлено, что все полученные фотограмметрические модели соответствуют принятым в исследовании требованиям к точности измерений и качеству исходных изображений, использованных при их построении. Результаты оценки качества фотограмметрических моделей представлены в таблице 23. Подробные данные апробации приведены в приложении З.

Таблица 23 – Результаты оценки точности фотограмметрических моделей ОАН

№	Объект	Требуемая точность промера	Размер объекта, м	СКП, мм	Относительная ошибка, 1/N	GSD, мм/пикс
1	Родники, об. 1	15 мм	6 × 5	5,20	1153	0,87
2	Родники, об. 2		6 × 5	4,19	1432	0,70
3	Родники, об. 3		11 × 8	8,66	1270	0,71
4	Родники, об. 4		5 × 5	3,75	1332	0,81
5	Раевское городище		22 × 11	14,34	1534	1,00
6	Лиманчик		13 × 13	14,53	1239	0,93

После оценки точности фотограмметрических моделей и подтверждения пригодности результатов съемки для формирования документации об объекте

археологического наследия были подготовлены производные материалы, такие как ортофотопланы, трехмерные модели (рисунок 23), чертежи раскопа с нанесенными нивелирными отметками, а также профили раскопа. Примеры подготовленных документов по объекту «Лиманчик» приведены на рисунке 24, а также в приложениях И, К.



Рисунок 23 – Трехмерная модель ОАН «Лиманчик»

а)

б)

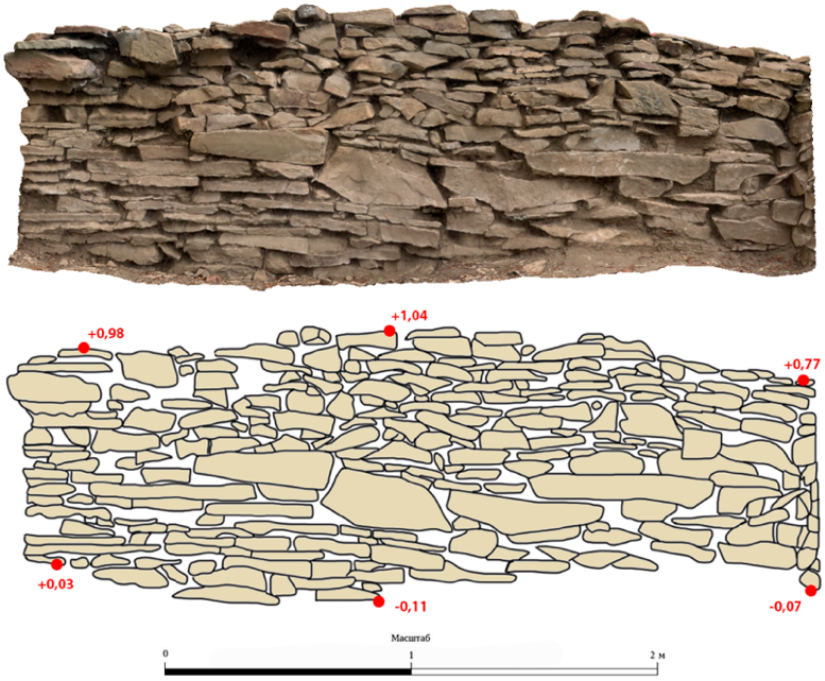


Рисунок 24 – Фас северо-западной стороны стены 1: а) ортофотоплан стены; б) чертеж с нивелирными отметками

Применение стереосистемы позволило сократить продолжительность полевой съемки на 57 % по сравнению с традиционной наземной съемкой. При этом объем исходных данных увеличился в среднем на 68 %, поскольку для каждого момента извлечения из синхронизированных видеопотоков формировалось два изображения, составляющих стереопару. Увеличение объема данных является закономерным следствием применения двухкамерной системы и не рассматривается как недостаток разработанной методики. Наличие синхронных изображений, полученных из двух пространственно-разнесенных центров проекции, обеспечивает стереоскопическое покрытие снимаемой поверхности, увеличивает избыточность фотограмметрических измерений и снижает вероятность отсутствия изображений отдельных участков объекта.

При подготовке отчетной документации по результатам полевых археологических работ были сформированы производные фотограмметрические продукты – ортофотопланы и цифровые модели местности, а также подготовлены чертежи раскопов, нивелирные планы и выполнено построение профилей ОАН.

Дополнительно исследована возможность передачи результатов фотограмметрической обработки между цифровыми фотограмметрическими системами без повторного уравнивания блока снимков и восстановления фотограмметрической модели. Используемая в исследовании ЦФС Agisoft Metashape Professional предусматривает возможность экспорта результатов фотограмметрической обработки в различные обменные форматы. В качестве основного формата для передачи результатов уравнивания блока снимков был выбран Bundler (*.out), применяемый в программных комплексах и вычислительных процессах на основе алгоритмов SfM и MVS [57].

Формат Bundler предназначен для хранения результатов уравнивания блока снимков и включает сведения о параметрах ориентирования снимков, положениях центров фотографирования, а также координатах связующих точек. Таким образом, данный формат позволяет передавать ориентированный блок снимков и облако связующих точек без повторного выполнения этапа уравнивания в принимающей системе. Вместе с тем формат Bundler имеет ряд ограничений,

связанных с неполной передачей параметров внутреннего ориентирования и модели дисторсии камеры, в связи с чем для корректного восстановления фотограмметрической модели его целесообразно сопровождать отдельным экспортом параметров калибровки камеры и исходным набором изображений.

В рамках эксперимента из основного проекта ЦФС Agisoft Metashape Professional были экспортированы: результаты уравнивания блока снимков в формате Bundler, параметры калибровки камеры, а также исходный набор фотоснимков. Затем указанный набор данных был импортирован в новый проект ЦФС Agisoft Metashape Professional без повторного уравнивания блока фототриангуляции. Для проверки корректности передачи данных была оценена точность импортированной фотограмметрической модели по контрольным промерам. Полученные значения расхождений совпали с результатами, установленными для исходного проекта, что подтверждает возможность использования формата Bundler в качестве обменного для передачи результатов уравнивания блока фототриангуляции при условии дополнительного сохранения параметров калибровки камеры и исходных изображений.

Выводы по разделу 3

1. Выполнена апробация разработанной методики документирования объектов археологического наследия, включающей применение фотограмметрической стереосистемы с фиксированным базисом, алгоритм синхронизации видеозаписей и формирования стереопар, а также требования к геометрии съемки и параметрам камер. Полученные результаты подтвердили работоспособность всех элементов методики в комплексе и возможность ее применения для создания измеримых фотограмметрических моделей объектов археологического наследия.

2. По результатам исследования установлены предельные размеры объектов, съемка которых обеспечивает соблюдение заданных требований к

точности. При использовании базиса стереосистемы для определения масштабного коэффициента фотограмметрической модели максимальный размер объекта составляет 3,5 × 3,5 м для режима 5,3K с частотой 60 кадр/с и 6 × 6 м для режима 4K с частотой 120 кадр/с. Применение ОМОМ для уточнения масштабного коэффициента позволило повысить точность измерений и расширить область действия методики до объектов размером 18 × 18 м при частоте 60 кадр/с и 23 × 23 м при частоте 120 кадр/с.

3. Рассмотрена возможность передачи фотограмметрической модели объекта археологического наследия в формате Bundler, обеспечивающая ее последующее использование различными группами исследователей без потери метрической точности и качества данных. Показано, что такие модели могут применяться как для подготовки производных фотограмметрических материалов – ортофотопланов, цифровых моделей местности и трехмерных моделей, – так и для формирования дополнительных документов об объекте археологического наследия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования достигнута поставленная цель – разработана методика фотограмметрической съемки для документирования объектов археологического наследия на основе наземной фотограмметрической видеосъемки с использованием стереосистемы с фиксированным базисом. В рамках предложенной методики созданы стереосистема для получения исходных данных и алгоритм синхронизации видеозаписей и формирования стереопар, обоснованы параметры выполнения съемки, разработан алгоритм фотограмметрической обработки и установлены требования к геометрической точности фотограмметрической модели и пространственному разрешению исходных изображений.

Основным техническим элементом методики является разработанная стереосистема с фиксированным базисом фотографирования, состоящая из двух жестко закрепленных цифровых камер. Постоянство их взаимного положения позволяет использовать известное расстояние между центрами проекций в качестве линейного размера для масштабирования фотограмметрической модели. Для созданного опытного образца выполнена калибровка камер и определено фактическое взаимное положение центров проекций, а также элементы внутреннего ориентирования каждой из них.

Для подготовки материалов съемки создан алгоритм синхронизации видеозаписей левой и правой камер по звуковому сигналу. Алгоритм обеспечивает определение временно́го смещения видеопотоков по звуковому маркеру, их обрезку по установленным временны́м отметкам и формирование стереопар. По результатам сопоставления звуковых сигналов погрешность синхронизации видеозаписей не превышала 0,005 с. Отдельно установлено, что при выборе ближайшего по времени кадра теоретическое предельное рассогласование, обусловленное дискретностью видеоряда, составляет половину межкадрового интервала: 1/120 с при частоте 60 кадр/с и 1/240 с при частоте 120 кадр/с. Алгоритм реализован в виде программы для ЭВМ, на которую получено свидетельство о государственной регистрации № 2025693254.

Разработана методика выполнения наземной фотограмметрической видеосъемки объектов археологического наследия. Обоснованы рабочие расстояния до объекта, направления и траектории маршрутов, углы наклона оптических осей камер, расстояния между соседними маршрутами, скорость перемещения стереосистемы и интервалы извлечения кадров. Основной схемой является перспективная маршрутная съемка в четырех направлениях с последующей дополнительной съемкой участков в зонах недостаточного покрытия.

Для построения фотограмметрической модели предложен алгоритм обработки сформированных стереопар, включающий уравнивание блока фототриангуляции по методу связок, масштабирование модели по известному базису и последующее уточнение ее масштаба и ориентирования. Для автоматизации задания базиса фотографирования создан программный модуль, формирующий в ЦФС Agisoft Metashape Professional масштабные линейки между центрами проекций изображений. Дополнительно разработан ОМОМ, позволяющий уточнять масштаб модели, ориентировать локальную систему координат по направлению на север и при наличии координат трех маркированных точек преобразовывать модель в систему координат объекта.

Для оценки пригодности результатов к документированию сформулированы два основных требования: допустимая погрешность линейных измерений по фотограмметрической модели должна быть не более 15 мм, а пространственное разрешение исходных изображений – не более 1 мм/пикс. Экспериментальные исследования подтвердили достижимость установленных требований. При масштабировании модели только по известному базису стереосистемы относительная ошибка измерений равнялась 1/228 при частоте 60 кадр/с и 1/394 при 120 кадр/с. После уточнения масштаба модели по ОМОМ относительная ошибка составила соответственно 1/1240 и 1/1516.

Разработанная методика апробирована в рамках Новороссийской археологической экспедиции ИА РАН. Выполнена съемка шести объектов археологического наследия, проведена их фотограмметрическая обработка и

подготовлены ортофотопланы, ЦМП, чертежи раскопов и профили. Сравнение с традиционной наземной фотограмметрической съемкой показало сокращение продолжительности полевых съемочных работ в среднем на 57 %. Опытный образец стереосистемы, методика съемки и алгоритмы обработки внедрены в практику документирования объектов археологического наследия ИА РАН и ИВ РАН.

Дополнительно подтверждена возможность передачи результатов уравнивания блока фототриангуляции в формате Bundler при совместном сохранении исходных изображений и параметров калибровки камер, что позволяет повторно использовать результаты обработки без проведения новой полевой съемки.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются создание промышленного образца разработанной стереосистемы с усовершенствованной конструкцией, средствами контроля базиса и специализированным программным обеспечением для автоматизированной подготовки и обработки материалов, а также дальнейшее развитие методики совместно со специалистами в области археологии с целью формирования комплексного подхода к фотограмметрическому документированию объектов археологического наследия.

Таким образом, основным результатом диссертационного исследования является разработанная методика фотограмметрической съёмки для документирования объектов археологического наследия, обеспечивающая получение исходных изображений с требуемым пространственным разрешением и построение масштабированных и ориентированных фотограмметрических моделей, позволяющих выполнять измерения с установленной геометрической точностью и подготавливать археологическую документацию.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ОАН – объект археологического наследия.

ГИС – геоинформационная система.

ИА РАН – Институт археологии Российской академии наук.

ИВ РАН – Институт востоковедения Российской академии наук.

ОМОМ – ориентирно-масштабный ортогональный модуль.

СКП – среднеквадратическая погрешность.

ЦМП – цифровая модель поверхности.

ЦМР – цифровая модель рельефа.

ЦФС – цифровая фотограмметрическая система.

ЦСФС – цифровая стереофотограмметрическая система.

ЭВМ – электронная вычислительная машина.

ЭВО – элементы внешнего ориентирования.

CRAB (Calibrated Rig for Aquatic Photogrammetric Bicamera System) – калиброванная установка для подводной фотограмметрической двухкамерной съемки.

FPS (frames per second) – количество кадров, записываемых за одну секунду.

GNSS (Global Navigation Satellite System) – глобальная навигационная спутниковая система.

GOP (Group of Pictures) – группа кадров в сжатом видеопотоке.

GPMF (GoPro Metadata Format) – формат метаданных GoPro.

GPS (Global Positioning System) – глобальная система позиционирования.

GSD (Ground Sample Distance) – размер пикселя на местности.

HEVC (High Efficiency Video Coding) – стандарт высокоэффективного видеокодирования.

ISO (International Organization for Standardization) – параметр светочувствительности (усиления сигнала) цифровой камеры, задаваемый по шкале ISO.

MVS (Multi-View Stereo) – многовидовая стереореконструкция.

SfM (Structure from Motion) – восстановление структуры по движению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алтынов, А. Е. Аэрофотогеодезические методы при археологических работах / А. Е. Алтынов, А. В. Мочалов, Д. О. Дрыга // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2021. – Т. 65. – № 5. – С. 543–549. – DOI: 10.30533/0536-101X-2021-65-5-543-549.

2. Алябьев, А. А. Фотограмметрия в развитии городских агломераций / А. А. Алябьев, А. Е. Иванов, А. А. Кобзев, В. Н. Никитин // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27. – № 1. – С. 30–41. – DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-1-30-41.

3. Аникеева, И. А. Обоснование допустимых размеров пикселя на местности и параметров сжатия аэро- и космических изображений, получаемых для целей картографирования / И. А. Аникеева // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – Т. 63. – № 4. – С. 446–454. – DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-4-446-454.

4. Аникеева, И. А. Факторы, критерии и требования к изобразительному качеству материалов аэрофотосъемки, получаемой для целей картографирования / И. А. Аникеева // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25. – № 4. – С. 104–119. – DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-104-119.

5. АО «Урало-Сибирская геоинформационная компания» [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://usgik.ru/about (дата обращения: 10.11.2025).

6. Безменов, В. М. Фотограмметрия. Построение и уравнивание аналитической фототриангуляции / В. М. Безменов. – Казань : Казанский государственный университет, 2009.

7. Блохин, В. Г. Геоинформационные системы для поддержки археологических данных / В. Г. Блохин, Н. М. Кузьмин, Е. В. Перерва, С. С. Хохлова, О. А. Шинкарь // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 9, Исследования молодых ученых. – 2010. – Вып. 8. – Ч. 2. – С. 141–146.

8. Виды калибровок фотограмметрических камер [Электронный ресурс] // Studfile. – Режим доступа: https://studfile.net/preview/9693646/page:7/ (дата обращения: 14.01.2025).

9. Вычисление контрастности цветов [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://ilyachalov.livejournal.com/285185.html (дата обращения: 05.04.2025).

10. ГОСТ Р 51833-2001. Фотограмметрия. Термины и определения [текст]. – М. : Госстандарт России, 2001.

11. ГОСТ Р 56905-2016. Проведение обмерных и инженерно-геодезических работ на объектах культурного наследия. Общие требования [текст]. – М. : Стандартинформ, 2016.

12. ГОСТ Р 58854-2020. Фотограмметрия. Требования к созданию ориентированных аэроснимков для построения стереомоделей застроенных территорий [текст]. – М. : Стандартинформ, 2020.

13. Груздева, Е. А. Применение цифровых технологий в изучении материальных объектов / Е. А. Груздева, Е. Ю. Орлова // Баландинские чтения. – 2018. – Т. 13. – № 1. – С. 36–42.

14. Грушин, С. П. Фотограмметрия в археологии: методика и перспективы / С. П. Грушин, И. А. Сосновский // Теория и практика археологических исследований. – 2018. – Т. 21. – № 1. – С. 99–105. – DOI: 10.14258/tpai(2018)1(21).-08.

15. Гук, Д. Ю. Документирование археологических раскопок в цифровую эпоху / Д. Ю. Гук // Историческая информатика. – 2018. – № 2. – С. 101–114. – DOI: 10.7256/2585-7797.2018.2.26811.

16. Данилов, В. А. Сравнение методов фотограмметрии и лазерного сканирования для создания трехмерных моделей объектов и территорий археологических ГИС (на примере археологического раскопа Увекского городища) / В. А. Данилов, А. В. Федоров, Л. С. Безвершенко // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия «Науки о Земле». – 2019. – Т. 19. – Вып. 2. – С. 72–78. – DOI: 10.18500/1819-7663-2019-19-2-72-78.

17. Зайцева, О. В. «3D-революция» в археологической фиксации в российской перспективе / О. В. Зайцева // Сибирские исторические исследования. – 2014. – № 4. – С. 10–20.

18. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500 (ГКИНП-02-033-82) [текст]. – М. : Недра, 1982.

19. Карачаров, К. Г. О регламентации проведения археологических раскопок на территории Ханты-Мансийского автономного округа — Югры («Правила проведения археологических раскопок на территории Ханты-Мансийского автономного округа — Югры») / К. Г. Карачаров // Ханты-Мансийский автономный округ в зеркале прошлого : сб. статей / отв. ред. Я. А. Яковлев. Вып. 16. – Томск ; Ханты-Мансийск ; Изд-во Том. ун-та, 2018. – С. 28–55.

20. Книжников, Ю. Ф. Аэрокосмические методы географических исследований: учебник / Ю. Ф. Книжников, В. И. Кравцова, О. В. Тутубалина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Академия, 2011. – 416 с. – ISBN 978-5-7695-6830-5.

21. Князь, В. А. Калибровка оптической системы для трехмерных измерений в гидродинамической трубе / В. А. Князь, Д. Г. Степаньянц, О. Ю. Царева // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45. – № 1. – С. 58–65. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-741.

22. Кодированные марки и масштабные линейки в Agisoft PhotoScan Pro 1.1: пошаговое руководство [текст]. – Agisoft, 2014. – Режим доступа: https://www.agisoft.com/pdf/PS_1.1_Tutorial%20%28IL%29%20-%20Coded%20Targes%20and%20Scale%20Bars%20%28Russian%29.pdf (дата обращения: 23.12.2024).

23. Лебедев, М. А. Использование фотограмметрии при раскопках древнеегипетских скальных гробничных комплексов: перспективы и ограничения метода / М. А. Лебедев // Археология и геоинформатика. Четвертая международная конференция: тезисы докладов. – М. : Институт археологии РАН, 2021. – С. 56–57.

24. Малышев, А. А. Могильник Родники: топография и археология / А. А. Малышев, С.С. Горланов, Д.О. Дрыга, А.В. Мочалов // Краткие сообщения Института археологии. – 2023. – Вып. 270. – С. 220–234. – DOI: 10.25681/IARAS.0130-2620.270.220-234.

25. Малышев, А. А. Роль цифровых технологий в реконструкции антропогенных ландшафтов древней Синдики / А. А. Малышев, Д. О. Дрыга,

А. В. Мочалов, В. В. Моор // Историческая информатика. – 2019. – № 4. – С. 108–121. – DOI: 10.7256/2585-7797.2019.4.31622.

26. Малышев, А. А. Синдика: история, археология, антропогенные ландшафты / А. А. Малышев, А. М. Новичихин, Д. О. Дрыга, Д. И. Жеребятьев, В. В. Моор, А. В. Мочалов. – М. : МАКС Пресс, 2022. – 68 с. – DOI: 10.29003/m3106.978-5-317-06888-2.

27. Мочалов, А. В. Стереосистема для создания трехмерных моделей для документирования объектов археологического наследия / А. В. Мочалов, А. Е. Алтынов, Д. О. Дрыга // Мониторинг. Наука и технологии. – 2026. – DOI: 10.25714/MNT.2026.68.009.

28. Мультикамерный монтаж: видеосъемка, сборка и автоматика [Электронный ресурс] // Фотосклад.Эксперт. – Режим доступа: https://www.fotosklad.ru/expert/articles/multikamernyj-montaz-video-semka-sborka-i-avtomatika/ (дата обращения: 21.04.2025).

29. Основные методики полевой фиксации, применяемые ИИМК РАН [Электронный ресурс] // Институт истории материальной культуры РАН. – Режим доступа: https://www.old.archeo.ru/struktura-1/otdel-ohrannoi-arheologii/nauchnye-proekty-otdela-ohrannoi-arheologii/foto-k-metod (дата обращения: 03.06.2025).

30. Парфенова, Г. С. Оценка точности цифровых ортофотопланов / Г. С. Парфенова // ГЕО-СИБИРЬ-2006. Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли. – Новосибирск : СГГА, 2006. – Т. 3. – Ч. 1.

31. Положение о порядке проведения археологических полевых работ и составления научной отчетной документации (утв. постановлением Бюро Отделения историко-филологических наук РАН от 12.04.2023 № 15). – М. : Институт археологии РАН, 2023. – Режим доступа: https://archaeolog.ru/media/OPI/Polozhenie_2023_25012024.pdf (дата обращения: 23.08.2024).

32. Прокопец, С. Д. Современные способы фиксации археологических объектов в полевых условиях / С. Д. Прокопец, Д. М. Белов // Мультидисциплинарные исследования в археологии. – 2018. – № 1. – С. 94–102.

33. Райзман, Ю. Г. Анализ точности фототриангуляции снимков камеры Phase One в ЦФС PHOTOMOD / Ю. Г. Райзман, А. Е. Зубарев, А. В. Смирнов, О. А. Корчагина // Геопрофи. – 2019. – № 4. – С. 39–43.

34. Руководство по топографическим съемкам в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500. Фототеодолитная съемка [текст]. – М. : Недра, 1977.

35. Руководство пользователя Agisoft Metashape Professional Edition, версия 2.2 [текст]. – Agisoft, 2025. – Режим доступа: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_2_ru.pdf (дата обращения: 14.08.2025).

36. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693254 (Российская Федерация) «Программа синхронизации видеозаписей и формирования стереопар». Заявка № 2025692444: дата подачи заявки – 19.11.2025; дата государственной регистрации – 27.11.2025 / А. В. Мочалов; правообладатель и автор А.В. Мочалов.

37. Свиридов, К. Н. О разрешающей способности и пространственном разрешении аэрокосмических систем дистанционного зондирования Земли / К. Н. Свиридов, А. Е. Тюлин // Информация и космос. – 2022. – № 2.

38. Скрыпицына, Т. Н. Курс лекций по дисциплинам «Основы архитектурной фотограмметрии» и «Архитектурная фотограмметрия» : учебное пособие / Т. Н. Скрыпицына, А. В. Уколова. – М. : МИИГАиК, 2020. – 127 с.

39. Скрыпицына, Т. Н. Лабораторный практикум по дисциплине «Наземная фотограмметрия» и «Основы архитектурной фотограмметрии» : учебное пособие / Т. Н. Скрыпицына, С. Б. Макаров. – М. : МИИГАиК, 2017. – 76 с.

40. Старовойтов, А. В. Нестрогая фотограмметрия как базовый метод для создания высокоточных планов раскопа на всех уровнях вскрытия / А. В. Старовойтов, И. Ю. Чернова // Ученые записки Казанского университета. Серия «Естественные науки». – 2020. – Т. 162. – Кн. 2. – С. 314–330. – DOI: 10.26907/2542-064X.2020.2.314-330.

41. Сухорукова, Е. П. Использование географических информационных систем в археологии / Е. П. Сухорукова, С. Э. Чумарина // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы : материалы X Международной научно-практической конференции. – Нижневартовск, 2022. – С. 226–230. – DOI: 10.36906/KSP-2022/31.

42. Требелева, Г. В. Применение фотограмметрии в работах совместной российско-абхазской Маркульской археологической экспедиции ИА РАН и АбИГИ АНА / Г. В. Требелева, К. А. Глазов, А. С. Кизилов, В. Г. Юрков // Археология и геоинформатика. Пятая международная конференция: тезисы докладов. – М. : Институт археологии РАН, 2021.

43. Федеральный закон от 25.06.2002 № 73-ФЗ (ред. от 10.06.2026) «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. – 2002. – № 26. – Ст. 2519.

44. Хахулина, Н. Б. Применение современных геодезических технологий при изучении археологического памятника (на примере объекта культурного наследия «Городище Михайловский кордон») / Н. Б. Хахулина, Л. И. Маслихова, Б. А. Попов // Аграрная история. – 2023. – № 15. – С. 56–66. – DOI: 10.52270/27132447_2023_15_56.

45. Хлебникова, Т. А. Разработка технологической схемы сбора и обработки данных аэрофотосъемки с использованием беспилотных авиационных систем для моделирования геопространства / Т. А. Хлебникова, Х. К. Ямбаев, О. А. Опритова // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 1. – С. 106–118. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-1-106-118.

46. Ходьба человека [Электронный ресурс] // Википедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ходьба_человека (дата обращения: 11.08.2025).

47. Цифровая стереофотограмметрическая система «Информационный стереоскопический образ территории» (ЦСФС «ИНСОТ») : руководство пользователя [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://disk.yandex.ru/d/IIZ_4EzyGLLTDA (дата обращения: 26.06.2026).

48. Цифровая фотограмметрическая система PHOTOMOD 6.4 : руководство пользователя. Уравнивание сети [Электронный ресурс] // Ракурс. – Режим доступа: https://racurs.ru/upload/medialibrary/pdf/solver.pdf (дата обращения: 16.04.2026).

49. Цифровая фотограмметрическая система PHOTOMOD 8.1 : руководство пользователя [Электронный ресурс] // Ракурс. – Режим доступа: https://racurs.ru/downloads/versions/doc/Docs81_windows/Rus/solver.pdf (дата обращения: 26.06.2026).

50. Чибуничев, А. Г. Автоматическое построение плотного облака точек по множеству снимков на основе полуглобального метода отождествления соответственных точек / А. Г. Чибуничев, А. П. Михайлов, В. В. Старшов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 2. – С. 14–18.

51. Чибуничев, А. Г. Фотограмметрия : учебник для вузов / А. Г. Чибуничев. – М. : МИИГАиК, 2022. – 328 с. – ISBN 978-5-91188-080-4.

52. 3D Modelling with Agisoft PhotoScan [Электронный ресурс] // Meerstone Community Archaeology. – Режим доступа: https://www.meerstone.co.uk/publications/35-3d-modelling-2.html (дата обращения: 01.03.2025).

53. Agisoft. Lens Calibration Using Chessboard Pattern in Metashape [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000160059-lens-calibration-using-chessboard-pattern-in-metashape (дата обращения: 29.07.2025).

54. Andrews, D. Metric Survey Specifications for Cultural Heritage / D. Andrews, J. Bedford, P. Bryan. – 3rd ed. – Swindon : Historic England, 2015. – 240 p.

55. Archaeology Guidelines Supplement: Photogrammetry [Электронный ресурс]. – Columbus : Ohio History Connection, 2022. – Режим доступа: https://www.ohiohistory.org/wp-content/uploads/2022/12/Archaeology_Guidelines_Supplement_Photogrammetry.pdf (дата обращения: 13.11.2025).

56. Autodesk. How to Take Photos for Optimal ReCap Photo Projects [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/How-

to-take-the-right-photos-to-be-used-in-ReCap-Photo.html (дата обращения: 15.11.2025).

57. Bianco, S. Evaluating the Performance of Structure from Motion Pipelines / S. Bianco, G. Ciocca, D. Marelli // Journal of Imaging. – 2018. – Vol. 4. – No. 8. – Art. 98. – DOI: 10.3390/jimaging4080098.

58. Bucchi, A. Recommendations for Improving Photo Quality in Close Range Photogrammetry, Exemplified in Hand Bones of Chimpanzees and Gorillas / A. Bucchi, J. Luengo, R. Fuentes, M. Arellano-Villalón, C. Lorenzo // International Journal of Morphology. – 2020. – Vol. 38. – No. 2. – P. 348–355. – DOI: 10.4067/S0717-95022020000200348.

59. Checking out the Minimum Focusing Distance for GoPro HERO11 Black [Электронный ресурс] // GoPro Forums. – Режим доступа: https://www.goproforums.com/threads/checking-out-the-minimum-focusing-distance-for-gopro-hero-11-black.89910/ (дата обращения: 16.05.2025).

60. Chibunichev, A. G. Photogrammetry for archaeology: collecting pieces together / A. G. Chibunichev, V. A. Knyaz, D. V. Zhuravlev, V. M. Kurkov // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2018. — Vol. XLII-2. — P. 235–240. — DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-235-2018.

61. ColorChecker Classic [Электронный ресурс] // Calibrite. – Режим доступа: https://calibrite.com/us/product/colorchecker-classic/ (дата обращения: 02.06.2025).

62. Dai, F. Photogrammetric Error Sources and Impacts on Modeling and Surveying in Construction Engineering Applications / F. Dai, Y. Feng, R. Hough // Visualization in Engineering. – 2014. – Vol. 2. – Art. 2. – P. 1–14. – DOI: 10.1186/2213-7459-2-2.

63. Delis, P. Point Cloud Derived from Video Frames: Accuracy Assessment in Relation to Terrestrial Laser Scanning and Digital Camera Data / P. Delis, M. Zacharek, D. Wierzbicki, A. Grochala // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2017. – Vol. XLII-2/W3. – P. 217–223. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-217-2017.

64. Delon, J. Small Baseline Stereovision / J. Delon, B. Rougé // Journal of Mathematical Imaging and Vision. – 2007. – Vol. 28. – No. 3. – P. 209–223. – DOI: 10.1007/s10851-007-0001-1.

65. Dufournaud, Y. Image Matching with Scale Adjustment / Y. Dufournaud, C. Schmid, R. Horaud // Computer Vision and Image Understanding. – 2004. – Vol. 93. – No. 2. – P. 175–194. – DOI: 10.1016/j.cviu.2003.07.003.

66. Epic Games. RealityScan Help: Comparison of MVS Settings [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://rshelp.capturingreality.com/en-US/tools/cmpmvs.htm (дата обращения: 09.05.2026).

67. FFmpeg [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ffmpeg.org/ (дата обращения: 07.04.2025).

68. Fraser, C. S. Zoom-Dependent Camera Calibration in Digital Close-Range Photogrammetry / C. S. Fraser, S. Al-Ajlouni // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2006. – Vol. 72. – No. 9. – P. 1017–1026. – DOI: 10.14358/PERS.72.9.1017.

69. Fraser, R. H. Towards Precise Drone-Based Measurement of Elevation Change in Permafrost Terrain Experiencing Thaw and Thermokarst / R. H. Fraser, S. G. Leblanc, C. Prevost, J. van der Sluijs // Drone Systems and Applications. – 2022. – Vol. 10. – No. 1. – DOI: 10.1139/dsa-2022-0036.

70. GoPro. GPMF Parser [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://gopro.github.io/gpmf-parser/ (дата обращения: 07.04.2025).

71. GoPro. Ultimate Guide to HERO11 Black [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://gopro.com/en/us/news/ultimate-guide-to-hero11-black (дата обращения: 07.04.2025).

72. Hemispherical Photography in Forest Science: Theory, Methods, Applications / ed. by R. A. Fournier, R. J. Hall. – Dordrecht : Springer, 2017. – 287 p. – DOI: 10.1007/978-94-024-1098-3.

73. HERO11 Black: Equipment-Manuals [Электронный ресурс]. – GoPro, 2022. – Режим доступа: https://cdn1.lib.jmu.edu/equipment-manuals/gopro_hero-11.pdf (дата обращения: 07.04.2025).

74. How to Use Two 360 Cameras to Produce 3D VR180 [Электронный ресурс] // Reddit. – Режим доступа: https://www.reddit.com/r/virtualreality/comments/sg7aox/how_to_use_two_360_cameras_to_produce_3d_vr180/ (дата обращения: 07.04.2025).

75. Johnson, J. Analysis of Image Forming Systems / J. Johnson // Proceedings of the Image Intensifier Symposium. – Fort Belvoir, VA : U.S. Army Engineer Research and Development Laboratories, 1958. – P. 249–273.

76. Kersten, T. Terrestrial Laser Scanning for the Documentation of Archaeological Objects and Sites on Easter Island / T. Kersten, M. Lindstaedt, K. Mechelke, B. Vogt // Fusion of Cultures: Proceedings of the 38th Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. – Oxford : Archaeopress, 2013. – P. 125–132.

77. Khambay, B. Validation and Reproducibility of a High-Resolution Three-Dimensional Facial Imaging System / B. Khambay, N. Nairn, A. Bell, J. Miller, A. Bowman, A. F. Ayoub // British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. – 2008. – Vol. 46. – P. 27–32. – DOI: 10.1016/j.bjoms.2007.04.017.

78. Kingsland, K. Comparative Analysis of Digital Photogrammetry Software for Cultural Heritage / K. Kingsland // Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage. – 2020. – Vol. 18. – Art. e00157. – DOI: 10.1016/j.daach.2020.e00157.

79. Lis, M. Does New Equipment Matter? An Assessment of Photogrammetric Documentation from Archaeological Research Conducted at Wawel Royal Castle in Years 2023–2024 / M. Lis // Interdisciplinaria Archaeologica: Natural Sciences in Archaeology. – 2026. – Vol. 17. – No. 1. – P. 9–16. – DOI: 10.24916/iansa.2026.1.1.

80. Martínez-Carricondo, P. Assessment of UAV-Photogrammetric Mapping Accuracy Based on Variation of Ground Control Points / P. Martínez-Carricondo, F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, F.-J. Mesas-Carrascosa, A. García-Ferrer, F.-J. Pérez-Porras // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2018. – Vol. 72. – PP. 1–10. – DOI: 10.1016/j.jag.2018.05.015.

81. Matuzevičius, D. Key-Point-Descriptor-Based Image Quality Evaluation in Photogrammetry Workflows / D. Matuzevičius, V. Urbanavičius, D. Miniotas, Š. Mikutis

// Electronics. – 2024. – Vol. 13. – No. 11. – Art. 2112. – DOI: 10.3390/electronics13112112.

82. McPherron, S. P. Structured Light Scanning for High-Resolution Documentation of In Situ Archaeological Finds / S. P. McPherron, T. Gernat, J.-J. Hublin // Journal of Archaeological Science. – 2009. – Vol. 36. – No. 1. – P. 19–24.

83. Moraes, F. R. Point Cloud Filtering and Device Performance in SfM: Comparing Cameras and Smartphones for 3D Modeling / F. R. Moraes, I. da Silva // Revista Brasileira de Geomática. – 2025. – Vol. 13. – No. 1. – P. 168–191.

84. Nocerino, E. Accuracy of Typical Photogrammetric Networks in Cultural Heritage 3D Modeling Projects / E. Nocerino, F. Menna, F. Remondino, R. Saleri // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2014. – Vol. XL-5. – PP. 465–472. – DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-465-2014.

85. NumPy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://numpy.org/ (дата обращения: 18.04.2025).

86. Ostrowski, W. Monitoring of Large-Scale Archaeological Excavations Using Photogrammetric Techniques: Nea Paphos Case Study / W. Ostrowski, Ł. Miszk, J. Modrzewski, Ł. Wilk, P. Lech // Journal of Archaeological Science Reports. – 2024. – Vol. 53. – Article 104353. – DOI: 10.1016/j.jasrep.2023.104353.

87. Patias, P. Multi-Image Matching for Architectural and Archaeological Orthoimage Production / P. Patias, V. Tsioukas // Proceedings of the XVII CIPA International Symposium. – Recife ; Olinda, 1999.

88. Paukkonen, N. Towards a Mobile 3D Documentation Solution: Video-Based Photogrammetry and iPhone 12 Pro as Fieldwork Documentation Tools / N. Paukkonen // Journal of Computer Applications in Archaeology. – 2023. – Vol. 6. – No. 1. – P. 143–154. – DOI: 10.5334/jcaa.135.

89. Perfetti, L. Fisheye Photogrammetry to Survey Narrow Spaces in Architecture and a Hypogea Environment / L. Perfetti, C. Polari, F. Fassi, S. Troisi, V. Baiocchi, S. Del Pizzo, F. Giannone, L. Barazzetti, M. Previtali, F. Roncoroni // Latest Developments in

Reality-Based 3D Surveying and Modelling. – Basel : MDPI, 2018. – DOI: 10.3390/books978-3-03842-685-1-1.

90. Photogrammetry Workflow [Электронный ресурс]. – Unity Technologies, 2017. – Режим доступа: https://unity3d.com/files/solutions/photogrammetry/Unity-Photogrammetry-Workflow_2017-07_v2.pdf (дата обращения: 23.07.2026).

91. Remondino, F. Digital Camera Calibration Methods: Considerations and Comparisons / F. Remondino, C. S. Fraser // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2006. – Vol. XXXVI-5. – P. 266–272.

92. Reverse Engineering Objects with Metashape: From Scan to CAD [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://www.agisoftmetashape.com/reverse-engineering-objects-with-metashape-from-scan-to-cad/ (дата обращения: 23.07.2026).

93. Roncella, R. Landslide Monitoring by Fixed-Base Terrestrial Stereo-Photogrammetry / R. Roncella, G. Forlani, M. Fornari, F. Diotri // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2014. – Vol. II-5. – P. 297–304. – DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-297-2014.

94. Rupnik, E. Aerial Multi-Camera Systems: Accuracy and Block Triangulation Issues / E. Rupnik, F. Nex, I. Toschi, F. Remondino // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2015. – Vol. 101. – P. 233–246. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.12.020.

95. Ruzgienė, B. Analysis of Camera Orientation Variation in Airborne Photogrammetry: Images under Tilt (Roll-Pitch-Yaw) Angles / B. Ruzgienė // Journal of Measurements in Engineering. – 2014. – Vol. 2. – No. 2. – P. 95–102.

96. Sapirstein, P. Establishing Best Practices for Photogrammetric Recording During Archaeological Fieldwork / P. Sapirstein, S. Murray // Journal of Field Archaeology. – 2017. – Vol. 42. – No. 4. – PP. 337–350. – DOI: 10.1080/00934690.2017.1338513.

97. Structure from Motion [Электронный ресурс] // CMSC 426: Computer Vision. University of Maryland. – Режим доступа: https://cmsc426.github.io/sfm/ (дата обращения: 02.02.2026).

98. Tanduo, B. Underwater Heritage Documentation Using Photogrammetry: The CRAB System / B. Tanduo, E. Borgogno, F. Chiabrando, F. Gallitto, S. Manca, P. Maschio, A. Lingua // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2025. – Vol. XLVIII-2/W10-2025. – P. 295–302. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W10-2025-295-2025.

99. Torres, R. Mapping at Depth: A Case-Study of Digital Video-Frame Photogrammetry Applied to Underwater Archaeology / R. Torres // Revista Noctua: Arqueologia e Patrimônio. – 2019. – Vol. 1 (4). – P. 3–19.

100. Torresani, A. Videogrammetry vs Photogrammetry for Heritage 3D Reconstruction / A. Torresani, F. Remondino // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2019. – Vol. XLII-2/W15. – P. 1157–1162. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-1157-2019.

101. Van Damme, T. Computer Vision Photogrammetry for Underwater Archaeological Site Recording in a Low-Visibility Environment / T. Van Damme // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2015. – Vol. XL-5/W5. – P. 231–238. – DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W5-231-2015.

102. Wang, R. Stereo DSO: Large-Scale Direct Sparse Visual Odometry with Stereo Cameras [Электронный ресурс] / R. Wang, M. Schwörer, D. Cremers. 2017 // Режим доступа: arXiv:1708.07878.

103. Wierzbicki, D. Assessment of the Influence of UAV Image Quality on the Orthophoto Production / D. Wierzbicki, M. Kędzierski, A. Fryskowska // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2015. – Vol. XL-1/W4. – P. 1–8. – DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-1-2015.

104. World Wide Web Consortium (W3C) [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://www.w3.org/ (дата обращения: 21.06.2025).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025693254

Программа синхронизации видеозаписей и формирования стереопар

Правообладатель: ***Мочалов Александр Валерьевич (RU)***

Автор(ы): ***Мочалов Александр Валерьевич (RU)***

Заявка № **2025692444**
Дата поступления **19 ноября 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***27 ноября 2025 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7add8d531b4b8818e75f29506
Владелец Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Фрагмент кода программного модуля автоматизации задания базиса фотографирования

```
import Metashape
DISTANCE = 0.253
ACCURACY = 0.0005
doc = Metashape.app.document
chunk = doc.chunk
def parse_rig_label(label: str):
    stem = label.rsplit(".", 1)[0]
    if stem.endswith("_l"):
        return "l", stem[:-2]
    if stem.endswith("_r"):
        return "r", stem[:-2]
    return None, None
left_cams = {}
right_cams = {}
for cam in chunk.cameras:
    if not (cam and cam.enabled):
        continue
    side, base = parse_rig_label(cam.label)
    if side is None:
        continue
    if side == "l":
        left_cams[base] = cam
    else:
        right_cams[base] = cam
for base in left_cams:
    if base in right_cams:
        scalebar = chunk.addScalebar(left_cams[base], right_cams[base])
        scalebar.reference.distance = DISTANCE
        scalebar.reference.accuracy = ACCURACY
```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Точность синхронизации стереопар стереосистемы

№	Стереопара	B_{cc}, мм	Частота кадров			
			60 FPS		120 FPS	
			$B_{\text{факт}}$, мм	ΔB, мм	$B_{\text{факт}}$, мм	ΔB, мм
1	0001_l_0001_r	253	254,12	–1,12	253,57	–0,57
2	0002_l_0002_r		254,05	–1,05	253,55	–0,55
3	0003_l_0003_r		254,03	–1,03	253,54	–0,54
4	0004_l_0004_r		254,00	–1,00	253,52	–0,52
5	0005_l_0005_r		253,97	–0,97	253,51	–0,51
6	0006_l_0006_r		254,01	–1,01	253,54	–0,54
7	0007_l_0007_r		254,07	–1,07	253,56	–0,56
8	0008_l_0008_r		253,95	–0,95	253,52	–0,52
9	0009_l_0009_r		254,04	–1,04	253,53	–0,53
10	0010_l_0010_r		253,99	–0,99	253,50	–0,50
11	0011_l_0011_r		254,03	–1,03	253,55	–0,55
12	0012_l_0012_r		254,09	–1,09	253,51	–0,51
13	0013_l_0013_r		253,98	–0,98	253,54	–0,54
14	0014_l_0014_r		254,01	–1,01	253,53	–0,53
15	0015_l_0015_r		254,13	–1,13	253,56	–0,56
16	0016_l_0016_r		253,96	–0,96	253,50	–0,50
Среднее			**254,03**	**1,03**	**253,53**	**0,53**

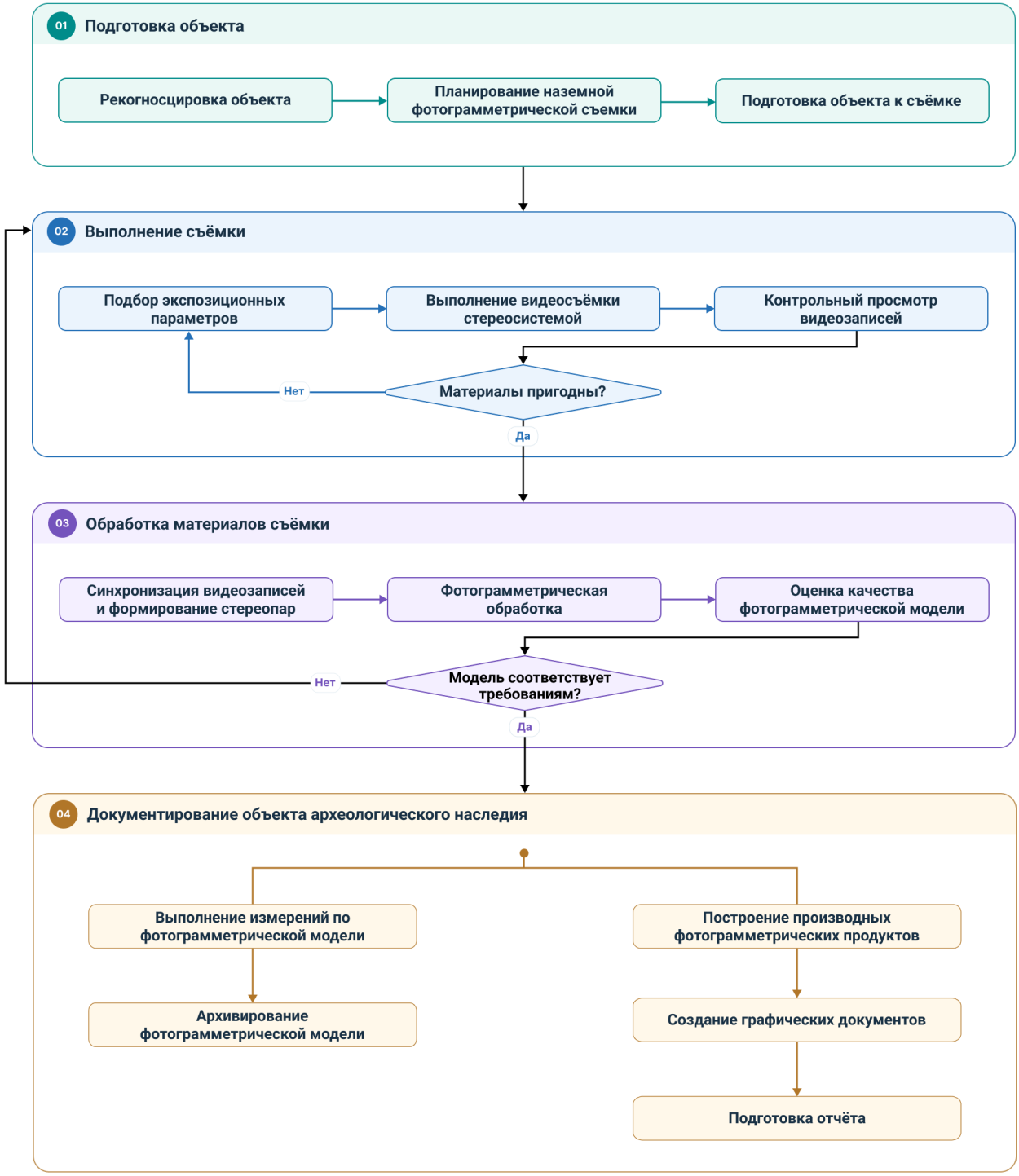
ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Оценка измерительной способности стереосистемы по тест-объекту

№	Наимено-вание	Промер, S, мм	Частота кадров					
			60 FPS			120 FPS		
			$S_{\text{факт}}$, мм	ΔS, мм	$\Delta S/S$	$S_{\text{факт}}$, мм	ΔS, мм	$\Delta S/S$
1	t_5–t_24	669,20	671,98	–2,78	241	670,65	–1,45	462
2	t_5–t_77	855,90	859,56	–3,66	234	857,84	–1,94	441
3	t_5–t_96	1086,46	1091,08	–4,62	235	1088,93	–2,47	440
4	t_24–t_96	855,90	859,57	–3,67	233	857,71	–1,81	473
5	t_24–t_77	1086,46	1091,32	–4,86	224	1089,07	–2,61	416
6	t_77–t_96	669,20	671,96	–2,76	242	670,71	–1,51	443
7	t_33–t_40	286,80	287,99	–1,19	241	287,46	–0,66	435
8	t_33–t_79	475,50	477,44	–1,94	245	476,55	–1,05	453
9	t_33–t_86	555,30	557,89	–2,59	214	556,60	–1,30	426
10	t_40–t_79	555,30	557,58	–2,28	243	556,51	–1,21	458
11	t_79–t_86	286,80	288,01	–1,21	237	287,41	–0,61	470
12	t_40–t_86	475,50	477,52	–2,02	235	476,49	–0,99	480

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Технологическая схема документирования объектов археологического наследия



ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Оценка измерительной способности стереосистемы на тестовом полигоне

№	Наименование	Промер, S, мм	Частота кадров					
			60 FPS			120 FPS		
			$S_{факт}$, мм	ΔS, мм	$\Delta S/S$	$S_{факт}$, мм	ΔS, мм	$\Delta S/S$
1	t 27_t 28	4571,48	4548,26	23,22	197	4558,04	13,44	340
2	t 21_t 28	11046,34	10998,16	48,18	229	11018,46	27,88	396
3	t 20_t 21	4617,50	4602,87	14,63	316	4609,03	8,47	545
4	t 20_t 27	10790,02	10740,9	49,12	220	10761,59	28,43	380
5	t 25_t 29	6324,57	6297,06	27,51	230	6308,65	15,92	397
6	t 24_t 29	6184,88	6158,58	26,30	235	6169,66	15,22	406
7	t 23_t 29	6590,69	6564,11	26,58	248	6575,31	15,38	428
8	t 25_t 30	7033,96	6997,51	36,45	193	7012,87	21,09	333
9	t 24_t 30	6461,57	6426,61	34,96	185	6441,34	20,23	319
10	t 23_t 30	7173,73	7134,75	38,98	184	7151,17	22,56	318
11	t 28_t 26	3137,89	3121,95	15,94	197	3128,68	9,21	341
12	t 25_t 26	4034,17	4016,58	17,59	229	4023,99	10,18	396
13	t 23_t 26	3818,43	3806,34	12,09	316	3811,43	7,00	546
14	t 27_t 26	2955,76	2942,31	13,45	220	2947,98	7,78	380
15	t 25_t 22	3474,84	3459,73	15,11	230	3466,1	8,74	398
16	t 21_t 22	3841,76	3825,42	16,34	235	3832,3	9,46	406
17	t 20_t 22	4061,86	4045,48	16,38	248	4052,38	9,48	429
18	t 23_t 22	3700,04	3680,86	19,18	193	3688,94	11,10	333
Относительная ошибка			1/228			1/394		
СКП, мм			27			15		

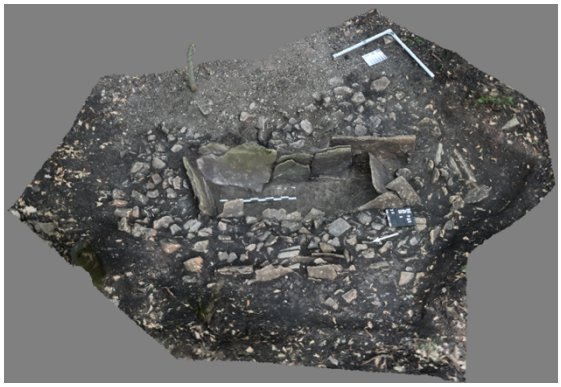
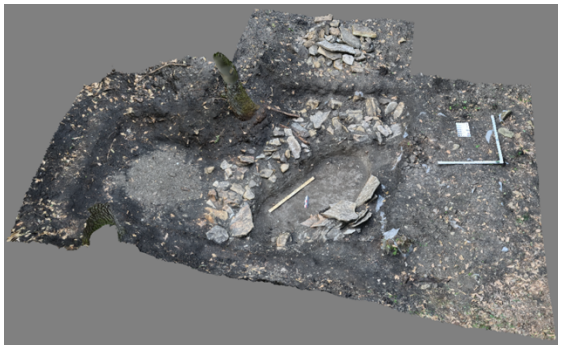
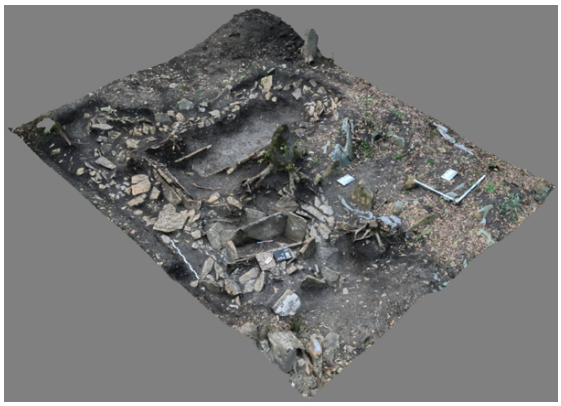
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

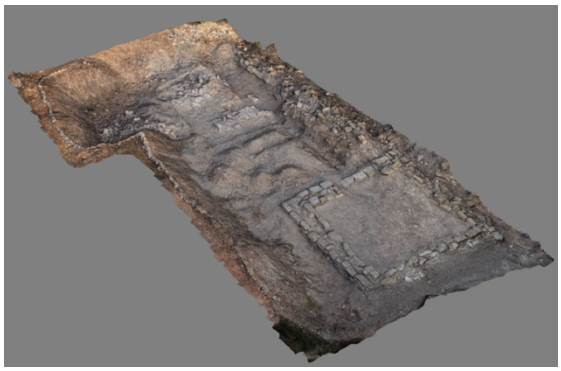
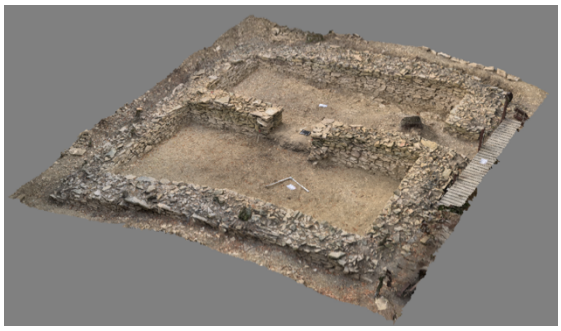
Оценка измерительной способности стереосистемы на тестовом полигоне с применением ОМОМ

№	Наименование	Промер, S мм	Частота кадров					
			60 FPS			120 FPS		
			$S_{факт}$, мм	ΔS, мм	$\Delta S/S$	$S_{факт}$, мм	ΔS, мм	$\Delta S/S$
1	t 27_t 28	4571,48	4568,48	3,00	1522	4568,48	3,00	1522
2	t 21_t 28	11046,34	11036,34	10,00	1104	11053,34	–7,00	1578
3	t 20_t 21	4617,50	4621,5	–4,00	1155	4620,5	–3,00	1540
4	t 20_t 27	10790,02	10781,02	9,00	1199	10796,02	–6,00	1798
5	t 25_t 29	6324,57	6320,57	4,00	1580	6328,57	–4,00	1582
6	t 24_t 29	6184,88	6179,88	4,99	1238	6188,88	–4,01	1544
7	t 23_t 29	6590,69	6597,69	–7,00	942	6594,69	–4,00	1649
8	t 25_t 30	7033,96	7028,96	5,00	1406	7029,96	4,00	1758
9	t 24_t 30	6461,57	6454,57	7,00	924	6457,57	4,00	1617
10	t 23_t 30	7173,73	7167,73	6,00	1196	7178,73	–5,00	1434
11	t 28_t 26	3137,89	3139,89	–2,00	1567	3139,89	–2,00	1567
12	t 25_t 26	4034,17	4030,17	4,00	1008	4037,17	–3,00	1346
13	t 23_t 26	3818,43	3815,43	3,00	1274	3821,43	–3,00	1272
14	t 27_t 26	2955,76	2953,76	2,00	1479	2957,76	–2,00	1477
15	t 25_t 22	3474,84	3477,84	–3,00	1157	3476,84	–2,00	1734
16	t 21_t 22	3841,76	3838,76	3,00	1280	3838,76	3,00	1280
17	t 20_t 22	4061,86	4058,86	3,00	1355	4058,86	3,00	1355
18	t 23_t 22	3700,04	3696,04	4,00	926	3703,04	–3,00	1231
Относительная ошибка			1/1240			1/1516		
СКП, мм			5,17			3,84		

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

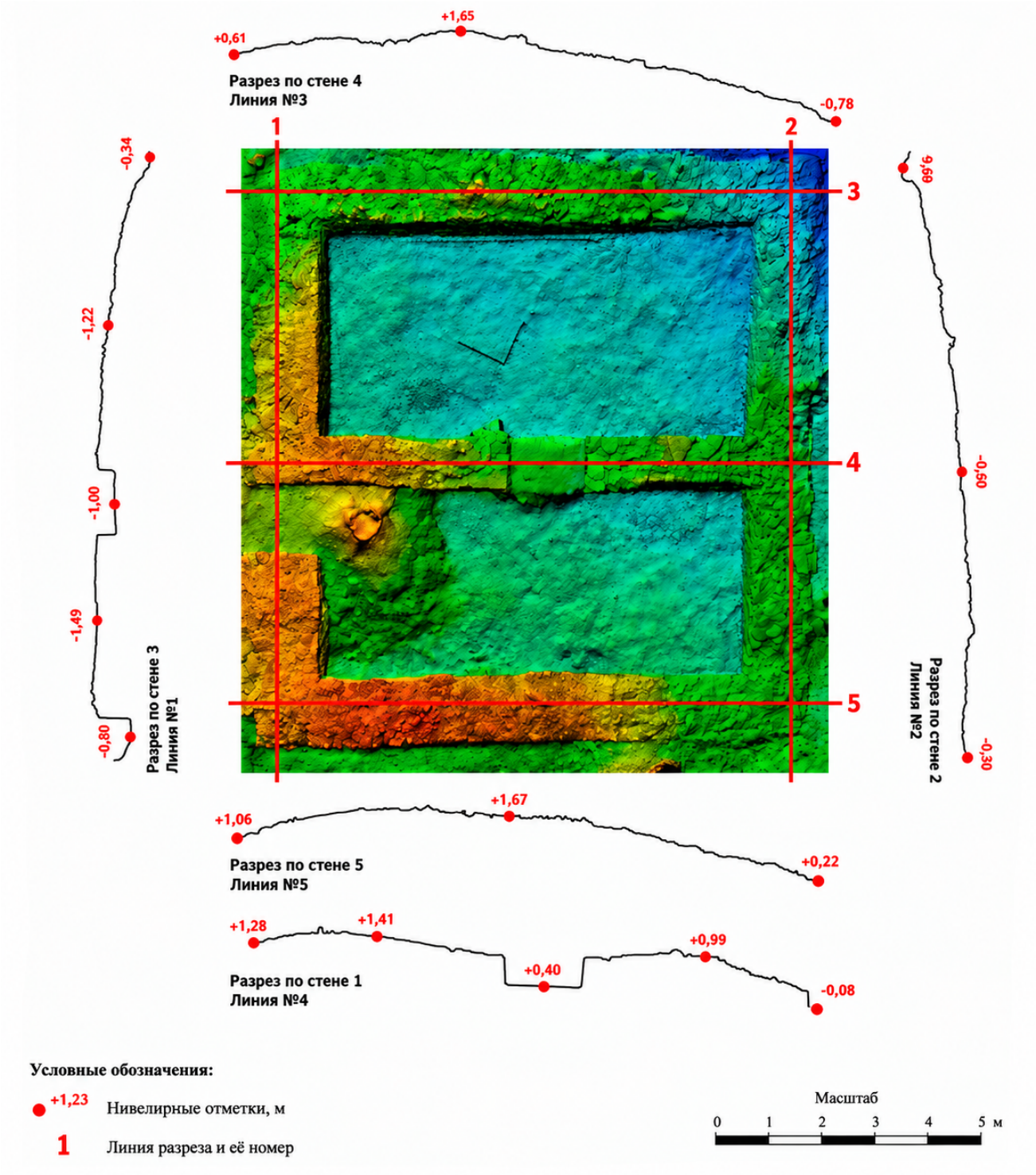
Результаты апробации методики съемки в рамках Новороссийской археологической экспедиции

№	Название и тип	Результат съемки		Фото
1	Родники-1 (об. 1), погребение	Площадь объекта, $м^2$	18	
		Время съемки, мин	3,9	
		Размер файлов, Гб	2,3	
		Относительная ошибка	$\frac{1}{1153}$	
		СКП по промерам, мм	5,2	
		Пространственн-ое разрешение, GSD, мм	0,9	
2	Родники-1 (об.2), погребение	Площадь объекта, $м^2$	20	
		Время съемки, мин	4,5	
		Размер файлов, Гб	3,6	
		Относительная ошибка	$\frac{1}{1432}$	
		СКП по промерам, мм	4,2	
		Пространственн-ое разрешение, GSD, мм	0,7	
3	Родники-1 (об. 3), погребение	Площадь объекта, $м^2$	60	
		Время съемки, мин	5,9	
		Размер файлов, Гб	3,6	
		Относительная ошибка	$\frac{1}{1270}$	
		СКП по промерам, мм	8,7	
		Пространственн-ое разрешение, GSD, мм	0,7	

4	Родники-1 (об. 4), погребение	Площадь объекта, м^2	18	
		Время съемки, мин	5,8	
		Размер файлов, Гб	2,8	
		Относительная ошибка	$\frac{1}{1332}$	
		СКП по промерам, мм	3,8	
		Пространственн-ое разрешение, GSD, мм	0,8	
5	Раевское городище, строение	Площадь объекта, м^2	250	
		Время съемки, мин	17,5	
		Размер файлов, Гб	12,5	
		Относительная ошибка	$\frac{1}{1534}$	
		СКП по промерам, мм	14,3	
		Пространственн-ое разрешение, GSD, мм	1,0	
6	Лиманчик, строение	Площадь объекта, м^2	170	
		Время съемки, мин	10	
		Размер файлов, Гб	8,2	
		Относительная ошибка	$\frac{1}{1239}$	
		СКП по промерам, мм	14,5	
		Пространственн-ое разрешение, GSD, мм	0,9	

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Разрезы конструктивных элементов сооружения ОАН «Лиманчик»



ПРИЛОЖЕНИЕ К

План выявленных сооружений ОАН «Лиманчик»

