

*На правах рукописи*



ДРЫГА ДАНИЛА ОЛЕГОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СЪЁМКИ ОБЪЕКТОВ  
КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
СИСТЕМ МУЗЕЕВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Специальность 25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли,  
фотограмметрия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» на кафедре аэрокосмических съёмок

**Научный руководитель:** **Алтынов Александр Ефимович**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», кафедра аэрокосмических съёмок, заведующий

**Официальные оппоненты:** **Комиссаров Александр Владимирович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», кафедра фотограмметрии и дистанционного зондирования, заведующий

**Воронин Евгений Геннадьевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, филиал АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» - Научно-производственное предприятие «ОПТЭКС», заместитель главного конструктора

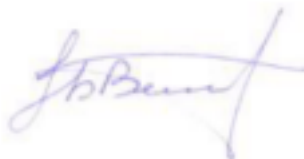
**Ведущая организация:** Акционерное общество "Научно-исследовательский институт точных приборов" (АО "НИИ ТП")

Защита диссертации состоится «28» мая 2020 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.04 при Московском государственном университете геодезии и картографии в зале заседаний Ученого совета по адресу: 105064, г. Москва, Гороховский пер., 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского государственного университета геодезии и картографии: <http://www.miiigaik.ru/upload/iblock/0e6/0e69ec6551d5b9d08d057445a52d914f.pdf>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Беленко В.В.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Трёхмерные фотореалистичные и высокоточные компьютерные модели объектов культурного наследия (далее ОКН) признаны среди историков, археологов и музейных работников как инструмент повседневного использования в практике научных исследований для расширения и популяризации научных знаний, обучения, представления, а также каталогизации и охраны объектов культурного наследия в музейных коллекциях. Возможность работы с историческим артефактом без контакта с оригиналом и изучения его дистанционно в компьютерной сети, находясь в любой точке планеты – это крупнейший прогресс в исторических исследованиях.

В области трёхмерного цифрового моделирования происходят непрерывные изменения, выражающиеся в совершенствовании съёмочного оборудования, разработке программного обеспечения и методик обработки данных съёмок, в максимальной степени автоматизирующих процесс получения моделей, а также разработке специализированного программного обеспечения для работы с цифровыми моделями. Большая заслуга в этом российских учёных - Блохинова Ю.Б., Журкина И.Г., Князя В.А., Лобанова А.Н., Михайлова А.П., Чибуничева А.Г. и многих др., а также зарубежных специалистов, среди которых: Armin Gruen, Thomas Luhmann, Keith B. Atkinson, Richard Hartley, Matt Weilberg и др.

Но главное, идет накопление соответствующего опыта как в практике цифрового моделирования реальности вообще, в широком смысле этого слова, так и в более узких областях – при создании фондов цифровых музейных коллекций, в археологических работах, охране памятников культурного наследия. За последние десять лет произошел резкий скачок в теории и практике цифрового трёхмерного моделирования, что коснулось и направления, связанного с моделированием ОКН. Среди крупных проектов в этой области необходимо отметить, прежде всего, цифровую коллекцию музея египетской археологии Питри с проектом «3d Petrie Museum», Смитсоновский институт (США) с проектом «SmithsonianX 3D». В этой области работает и Государственный Эрми-

таж в Санкт-Петербурге и ряд других крупных музеев Российской Федерации. Эти примеры подтверждают актуальность, востребованность и значимость рассматриваемого направления. Таким образом, актуальность темы определяется высокой степенью востребованности массового обеспечения заинтересованных организаций, прежде всего Российских музеев, методикой и технологией бюджетного уровня по созданию 3D-моделей ОКН с возможностью реальной работы с моделью для детального изучения её без использования оригинала.

**Степень разработанности темы исследования.** Трёхмерные фотореалистичные метрические модели высокого пространственного разрешения до сих пор не встали в ряд стандартных атрибутов и процедур при регистрации экспонатов музейных коллекций. Они все еще не интегрированы в большую часть автоматизированных информационных систем музеев, государственных и общественных организаций, занимающихся изучением и сохранением памятников истории и культуры. Этому положению имеется несколько причин. Наблюдается определенное противоречие между очевидной востребованностью этого инструмента исследования и ограничениями технологического и финансового плана, которые делают труднодоступным использование таких методов в исторических науках. И как следствие этого, многие музейеведы отдают большее предпочтение классической фото фиксации предметов коллекций, нежели появившимся сравнительно недавно «трёхмерным технологиям», считая последние дорогими, времязатратными и не имеющими гарантированного результата, т.е. низкоэффективными. Нашей задачей стало решение ряда научно-методических и технических проблем по разработке методики съёмки ОКН для создания цифровых моделей объектов, делающих доступной и легко решаемой задачу создания электронных каталогов цифровых моделей предметов музейных коллекций.

Серьезной проблемой является сложная интеграция технологий и опыта отдельных компаний, занимающихся технологиями трёхмерного моделирования в область исследований ОКН, а также аккумуляция накопленной информации и создание широкой базы знаний с погружением их в цифровые фонды с удалённым доступом, которые позволят специалистам по культурному насле-

дию не повторять ошибок тех, кто уже имеет значительный опыт по созданию каталогов цифровых трёхмерных моделей.

Проведенные на сегодняшний день опытные работы, связанные с созданием трёхмерных моделей объектов историко-культурного наследия, выявили не только проблемы существующих съёмочных систем, но и сопутствующего программного обеспечения для обработки результатов съёмок и дальнейшей работы с моделью. Приходится сделать вывод, что:

- ни одна из современных технологий трёхмерного моделирования не является универсальным решением для съёмки, создания моделей и визуализации всего многообразия объектов музейных коллекций;

- все автоматизированные технологии, которые в конечном итоге позволяют получить приемлемое качество геометрического и фотографического воспроизведения модели, на сегодняшний день практически всегда нуждаются в «ручном» вмешательстве для доводки модели высококвалифицированным персоналом.

**Объектами исследования** являются трёхмерные фотореалистичные и метрически точные цифровые модели экспонатов (объектов) музейных коллекций из предметов культурного наследия.

**Предметом исследования** являются методы и технологии наземной фотограмметрической съёмки для получения высокотехнологичных данных с целью создания фотореалистичных и метрически точных трёхмерных (и иной размерности) моделей объектов культурного наследия для представления их в доступном и удобном для дистанционного изучения формате.

**Цель диссертационного исследования** заключается в разработке методики наземной фотограмметрической съёмки объектов музейных коллекций и подходов к аэрофотосъёмке компактных объектов культурного наследия (с беспилотных аэрофотосъёмочных систем) с целью получения фотографических данных для создания их фотореалистичных и метрически точных 3D-моделей.

Поставленная цель достигается путем последовательного решения следующего комплекса задач:

- 1) изучение особенностей n-мерных моделей ОКН для выработки рекомендаций по применению возможного концептуального решения многомерного представления их в распределенных информационных системах и WEB;
- 2) анализ отечественного и зарубежного опыта и изучение существующих методов и технических решений построения трёхмерных моделей объектов культурного наследия, современных методов получения пространственных данных для последующего их использования при моделировании;
- 3) обоснование необходимой точности создания трёхмерных моделей ОКН для целей создания цифровых музейных коллекций;
- 4) разработка методики и алгоритма расчёта параметров фотограмметрической съёмки объектов культурного наследия в археологии и музейном деле.

#### **Основные научные результаты, выносимые на защиту:**

- решена научная задача разработки методики стереофотограмметрической съёмки объектов культурного наследия из музейных коллекций и компактных памятников архитектуры и археологии;
- теоретически обоснована необходимая точность построения моделей объектов музейных коллекций для целей каталогизации и хранения их в базах данных;
- расширена классификация размерности пространственных данных моделей объектов культурного наследия, помещаемых в цифровые каталоги для дистанционного доступа и работы с ними неограниченного числа пользователей и специалистов;
- предложены рекомендации по формату и параметрам оптимальной модели хранения информации об объектах культурного наследия в распределенных базах данных с удалённым доступом.

#### **Научная новизна** заключается в следующем:

- а) разработанная методика отличается от созданных ранее и применяемых в настоящее время тем, что использует в основе расчёта параметров фотограмметрической съёмки не линейный размер снимка, а видимый из точки фотографирования угловой размер объекта культурного наследия, ключевые размеры и

форму деталей на поверхности оригинала. Это привело к улучшению проработки на цифровой модели трудно воспроизводимых деталей, не выявляемых при стандартных подходах, что связано с повышением надежности выполнения этапа взаимного ориентирования снимков;

б) впервые вводится понятие размерности документальных сведений в диапазоне 1D - 5D об объектах культурного наследия, предназначенных для помещения их в цифровые каталоги музейных коллекций. Предложенная классификация данных о модели объекта культурного наследия различной размерности позволяет более полно представлять сведения о них в цифровых музейных коллекциях;

в) предложены требования к геометрической точности трёхмерных моделей предметов музейных коллекций и дано их теоретическое обоснование;

г) впервые в этой области знаний систематизированы основные способы представления и визуализации трёхмерных моделей объектов культурного наследия для дальнейшего их использования; даны рекомендации к структуре и формату хранения моделей в цифровой коллекции.

**Теоретическая значимость** диссертационного исследования состоит в развитии метода наземной фотограмметрической съёмки, позволяющего с высокой геометрической точностью и фотореалистичностью получать трёхмерные модели объектов культурного наследия. Для этого создана и обоснована методика съёмки, оригинальность которой заключается в подходе к расчёту параметров стереофотограмметрической съёмки и точности создаваемой модели. В работе обоснована необходимость использования предложенной методики при решении поставленной задачи, а также практически доказана её результативность.

**Практическая значимость** исследования определяется тем, что разработанная методика даёт возможность оптимального выбора условий и параметров фотографирования с целью получения расчётной точности построения моделей объектов без «мёртвых зон» и с любого направления в пределах  $4\pi$  стерадиан. Также предложенная методика является более доступной для широкого круга заинтересованных учреждений, что связано с минимальной стоимостью её тех-

нического обеспечения и снижением необходимости привлечения высококвалифицированных специалистов по фотограмметрии для создания цифровых фондов музейных коллекций.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой диссертационной работы явились методы системного анализа, экспериментальный метод, методы натурного, компьютерного и математического моделирования, в том числе методы 3D-моделирования.

**Степень достоверности.** Все расчёты, экспериментальные и натурные съёмки, выполненные в диссертационном исследовании, апробированы на реальных объектах музейных коллекций, а их трёхмерные модели размещены на сайтах российских музеев. Достоверность подтверждается использованием методики при оцифровке в 37 федеральных музеях РФ в рамках проекта «Культура РФ» (2014 г.), в ходе Новороссийской археологической экспедиции РАН (2015-2019 гг.), при реконструкции Георгиевского собора XIII в. (2018 г.), оцифровке экспонатов музейного комплекса МИИГАиК.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на:

- 1) научно-практическом семинаре «Роль музеев в информационном обеспечении исторической науки» (г. Москва 24–25 марта 2015 г.);
- 2) на 11-й Международной научно-практической конференции «Геопро-странственные технологии и сферы их применения» (г. Москва 13 октября 2015 г.) с докладом «Использование беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа в области археологических раскопок»;
- 3) на 70-ой, 71-ой, 72-й, 73-й и 74-й научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных МИИГАиК (Москва 2015-2019 г.г.);
- 4) на XXX-ых "Крупновских чтениях" по археологии Северного Кавказа 2018 г. с докладом «Политический центр азиатского Боспора в ранне-византийское время: исследования, топография и визуализация»;



Результаты исследований внедрены в практику работы Новороссийской археологической экспедиции РАН, в учебный процесс факультета Прикладной космонавтики Московского государственного университета геодезии и картографии на учебной практике по «Аэрофотосъёмке».

По материалам диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе четыре статьи в рецензируемых научных изданиях. Все результаты диссертационных исследований получены автором лично.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка принятых сокращений, списка использованной литературы и ряда приложений. Общий объем диссертации 138 страниц, включая 49 рисунков и 8 таблиц. Библиографический список включает 124 наименования, в том числе 62 зарубежных источника.

### **Основное содержание работы**

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, отражен уровень разработанности темы, сформулированы цель и задачи, определены основные методы и научная новизна работы.

**Первый раздел** диссертационной работы «Размерность цифровых моделей объектов музейных коллекций для их регистрации и каталогизации» посвящен изучению теоретических вопросов, связанных с размерностью данных, фиксируемых в информационных системах, рассмотрены необходимые сведения из области цифровой археологии и музейного дела, в том числе и для визуализации моделей ОКН. Рассматриваются основные концептуальные виды моделирования и обозначается место предлагаемого вида моделирования в разделе информационного графического моделирования. Отмечается, что в традиционных информационных моделях данных, реализованных в компьютерной среде, основанных на теории множеств, описание ОКН (*англ.* MCO - Material Culture Objects) формально представлено следующим набором атрибутов:

$$MCO_t = \{G(x, y, z), P(col, PBR), A(d)\}, \quad (1)$$

где  $MCO_t$  – запись в базе данных учетной единицы цифровой коллекции объектов культурного наследия с привязкой записи по времени;

$G(x, y, z)$  – совокупность данных, описывающих пространственный облик (метрику и топологию) объекта;

$P(\text{col}, \text{PBR})$  – совокупность данных, описывающих текстуру и колориметрию поверхности объекта;

$A(d)$  – совокупность, как правило, текстовых данных, представляющих максимально подробное описание (семантику) объекта;

$t$  – время съёмки ОКН или помещения его цифровой модели в БД.

В этой связи анализируются вопросы документирования объектов культурного наследия музейных коллекций в части размерности модели в цифровом хранилище, методы их создания, а также арсенал современных программно-технических средств создания и визуализации моделей различной размерности (2D, 2.5D, 3D, 4D, 5D).

Для того, чтобы обосновать наш подход к задачам создания фотореалистичных и метрических пространственных моделей объектов культурного наследия, были проанализированы современные методы и инструментарий, используемый профессиональным сообществом в этой области. Согласно логике классификации моделей (таблица 1), корректно созданная 3D-модель объекта является составной частью модели 4D и 5D, а модели меньшей размерности (2D, 2.5D) можно всегда получить из модели 3D. Поэтому далее рассматриваются методы и способы создания метрически точных и фотореалистичных 3D-моделей объектов музейных коллекций, которые можно рассматривать, изучать, масштабировать при любом ракурсе, а также производить измерения на поверхности модели с заданной точностью.

Таблица 1 – Варианты размерности описания объектов в моделях

Размерность модели	Варианты размерности объектов в моделях	Примеры отображения (визуализации) объекта
1D	1D	Текстовое описание объекта
2D	2D	Плоский чертёж, рисунок, фотография
2,5D	2,5D	Плоский чертеж (рисунок) в аксонометрии, анаглифические чертежи и фотографии.
3D	3D;	Цифровая трёхмерная (объемная) модель

	2D+T;	Несколько плоских чертежей, рисунков, фотографий, созданных в различные моменты времени
4D	3D+T;	Несколько объемных моделей, полученных в различные моменты времени

Примечание: D(imension) – метрика, T(ime) – время, S(cale) – масштаб.

Исходными данными для получения таких (трёхмерных поверхностных) моделей очевидно является облако точек в пространстве оригинала с высокой точностью позиционирования (топографическая часть) и корректной топологией (топологическая составляющая модели). На этом этапе анализа наиболее рациональным методом получения плотного облака точек представляются фотограмметрические методы, основанные на обработке оптимального количества перекрывающихся в области объекта снимков. Однако далее в работе также представлен анализ альтернативных методов и технологий создания трёхмерных моделей применительно к ОКН.

**Во втором разделе** – «Проблемы создания пространственных моделей объектов культурного наследия (в археологии, музейном деле)» исследованы способы получения пространственных данных, а также существующие методы построения цифровых трёхмерных моделей объектов музейных коллекций с использованием различных технологий. Анализируются условия получения оптимального, в том числе бюджетного, варианта съёмки и создания 3D-моделей ОКН. На сегодня для этого можно использовать достаточно большой набор средств, включающий следующие методы и технологии:

- а) метод натурных обмеров, в том числе с помощью электронных геодезических приборов;
- б) методы наземной или аэрофотограмметрии;
- в) методы наземного или воздушного лазерного сканирования;
- г) методы на основе контактного или оптического сканирования;
- д) методы магнитной (компьютерной) томографии;
- е) компьютерное интерактивное моделирование.

Проведенный в работе анализ и сравнительные оценки методов создания 3D-моделей объектов культурного наследия выявили преимущества *стереофотограмметрического метода*, который помимо высокой метрической

точности построения моделей (что имеет место и в других методах, например, при лазерном или оптическом сканировании) дает максимум информации о колориметрических свойствах объекта, текстурных свойствах его поверхности и, что немаловажно, является самым малозатратным среди рассмотренных. В мировой практике получения моделей малоразмерных объектов, в том числе и ОКН из музейных коллекций, имеет место использование разумного сочетания стереофотограмметрических методов и методов лазерного или оптического сканирования при условии материального обеспечения этих технологий.

В подтверждении сказанному о выборе стереофотограмметрической технологии создания 3D-моделей объектов музейных коллекций, приведем таблицу 2, в которой даны оценки по пятибалльной шкале каждого из рассмотренных методов через набор из девяти формальных параметров. Каждому из этих параметров присваивался вес – его значимость. Усредненные экспертные оценки вычислялись как среднее по опросу  $n = 11$ -и экспертов. Итоговый рейтинг

$$R = \sum_j (k_j \cdot \frac{\sum_i^n S_i}{n})$$

технологии вычислялся по формуле:

(2)

где  $k$ - весовой коэффициент оценочного параметра,  $S$ -балльная экспертная оценка каждого параметра.

Таблица 2 – Экспертная оценка основных методов создания трёхмерных моделей

j, номер параметра	Оценочный параметр	Весовой коэффициент параметра, $k_j$	Усредненные экспертные оценки методов создания 3D моделей $S_i$				
			Стереофотограмметрия	Лазерное сканирование	Оптическое сканирование	КТ/МРТ	Компьютерное моделирование
1	Геометрическая точность	5	4,9	4,9	4,1	4,9	2,3
2	Точность передачи текстуры	5	4,8	1,3	2,9	1,3	1,2
3	Скорость обработки	4	3,1	4,8	4,8	4,2	2,1
4	Сложность обработки	3	3,1	3,8	3,3	3,2	2,2
5	Автономность	4	4,9	4,0	2,9	1,5	4,7

6	Универсальность	3	4,9	3,2	3,2	2,1	3,1
7	Компактность	3	4,8	3,2	3,7	1,1	4,7
8	Стоимость оборудования	5	3,9	2,7	2,9	0,9	3,9
9	Время съёмки (обмера)	3	3,1	4,1	4,8	3,1	4,7
Рейтинг метода <b>R</b>			<b>146,9</b>	<b>122,23</b>	<b>147,7</b>	<b>122,6</b>	<b>125,3</b>

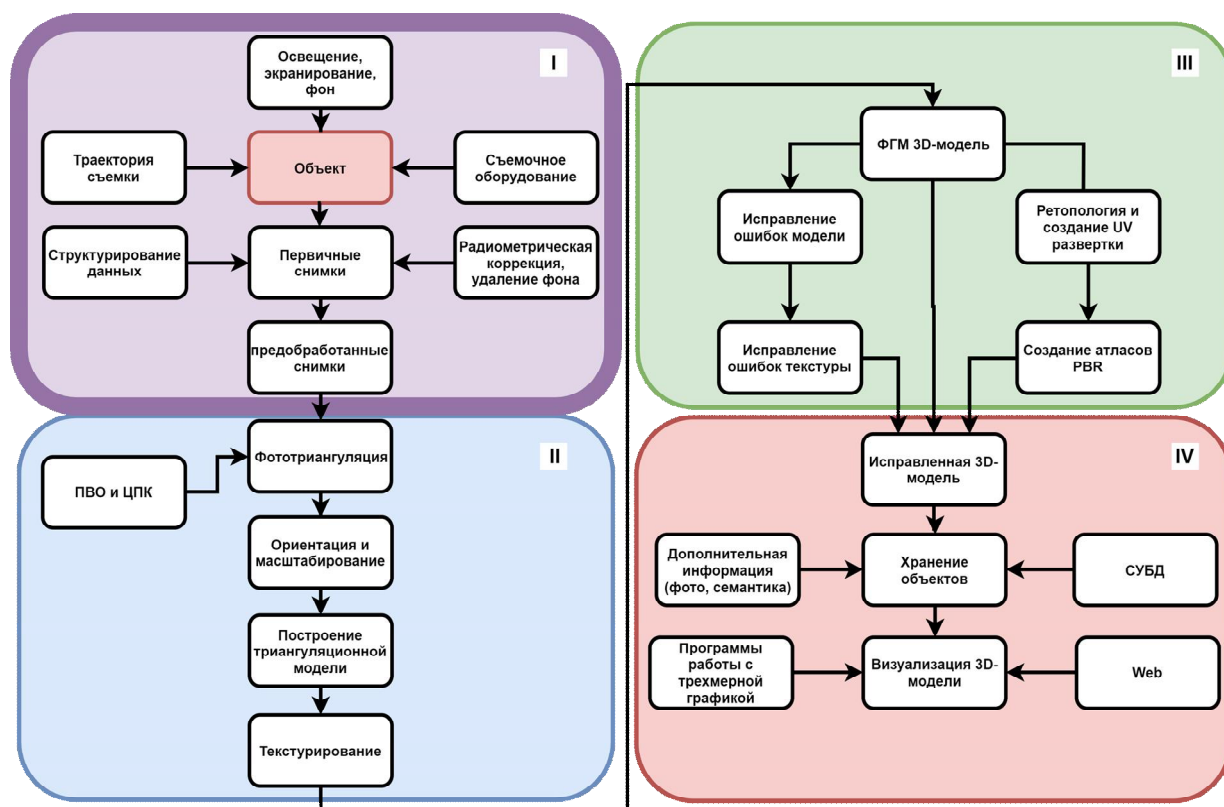
Понимая, что стереофотограмметрический метод включает в себя не только методы съёмки, но и корректную и эффективную стереофотограмметрическую обработку, нами тщательно проработан вопрос привлечения соответствующего прикладного программного обеспечения. На сегодня имеется очень большой перечень как бесплатных, так и коммерческих продуктов для 3D-моделирования различной степени сложности. Исходя из нашей ориентации на программное обеспечение, ядром которого должен быть «фотограмметрический процессор», обеспечивающий создание поверхностной модели объекта по серии перекрывающихся снимков, нами выделено несколько программных продуктов для исследования эффективности их применения в решении нашей задачи. Из полутора десятков доступных программных продуктов этого класса нами были привлечены для исследования 7 пакетов в версиях на 2018 г.

Если говорить о создании трёхмерной модели фотограмметрическими методами, то на сегодняшний день, в большей мере на результат влияет геометрия съёмки и изобразительное качество получаемых снимков. Таким образом, можно говорить о том, что основным вопросом создания трёхмерной модели является вопрос выбора оптимальной методики съёмки для создания фотограмметрической модели.

**В третьем разделе «Обоснование геометрии и методика наземной стереофотограмметрической съёмки экспонатов музейных коллекций»** проведено теоретическое обоснование точности получения моделей ОКН, проведены графоаналитический анализ и экспериментальные исследования, касающиеся выбора основных параметров съёмки. Создан специализированный стенд с целью апробации и отработки методики предметных съёмок на модельных и реальных объектах ОКН. На рисунке 1 представлена общая технологическая схема созда-

ния цифровых моделей ОКН, подготовки и помещения их в хранилище. Ядро методики составляет первый блок, выделенный на рисунке толстой линией.

Требования к точности построения и детальности модели ОКН нами установлены на основании следующих положений. При рассмотрении (изучении) предметов музейных коллекций (без использования дополнительных оптических приборов – линз, очков и пр.) с расстояния наилучшего зрения - 250 мм среднестатистический наблюдатель видит детали на поверхности объекта размером не менее 0,1 – 0,2 мм. Эта величина соответствует угловому разрешению зрительного аппарата человека - глаза - порядка 60". Очевидно, с такой точностью необходимо построение модели, то есть координаты характерных точек модели и размеры между ними не должны отличаться от размеров на



оригинале более чем на  $\pm 0,15$  мм.

Рисунок 1 – Общая технологическая схема создания цифровых моделей ОКН

В соответствии с этим геометрическая точность построения модели должна быть не хуже  $\pm 0,15$  мм. Следовательно, пространственное разрешение на поверхности модели должно быть не хуже  $\pm 0,1$  мм. Плотность точек на поверхности модели при этом также должна быть порядка 45 точек на  $1 \text{ мм}^2$ . Эти требо-

вания к точности модели относятся к ОКН малого размера с длиной, высотой и шириной ( $L_{,x} \times L_{,y} \times L_{,z}$ ) менее 300x300x300 мм, которые преобладают в коллекциях музеев.

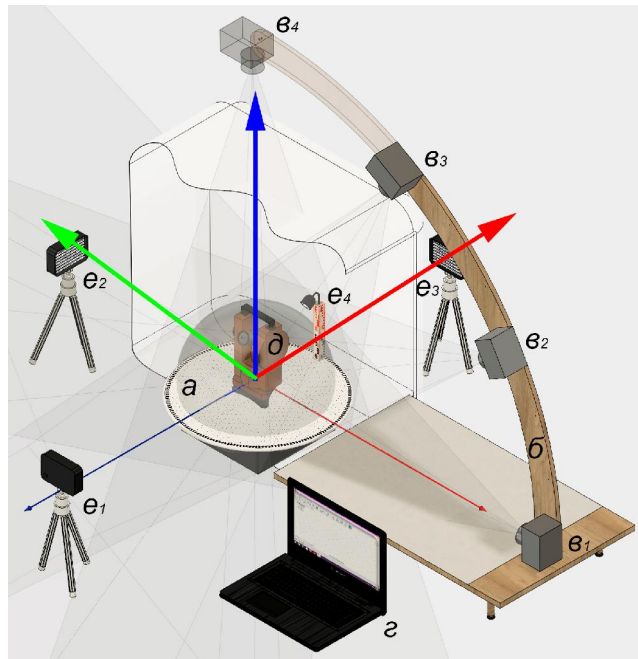
В этой связи мы полагаем, что полезно ввести показатель детальности и точности построения модели, который выражается коэффициентом относительной ошибки  $m = L_{mod}/D$ . Для объектов музейных коллекций предлагаемого выше размера этот показатель должен быть не менее  $300/0,15 = 2000$ . Если ОКН характеризуется большим размером порядка 3 м, то при «заданной» относительной ошибке  $m = 2000$  точность и детальность модели естественно будет больше, но не хуже  $\pm 1,5$  мм.

В первом блоке технологии (рисунок 1) нами исследовались основные параметры съёмки, определяющие в конечном итоге метрические, колориметрические и текстурные характеристики модели. К таким параметрам относятся – а) пространственное разрешение на объекте съёмки; б) траектория маршрутов съёмки и их количество; в) число точек фотографирования на маршруте; г) требования установки элементов внешнего ориентирования снимков; д) количество и расположение опорных и контрольных точек съёмочного обоснования; е) особенности освещения объекта съёмки. Из дополнительных условий и параметров съёмки нами рассматривались: особенности самого объекта - съёмные части объекта, жесткие тени, бликующие поверхности, прозрачные поверхности, очень тонкие части объектов, перекрывающиеся части объектов, простые монотонные объекты, повторяющиеся элементы объекта и особенности съёмки - элементы внутреннего ориентирования и дисторсия камер, фокусировка и глубина резко отображаемого пространства, хроматическая aberrация объективов камер, параметры сжатия изображений и оптимальная экспозиция.

Для ответов на большую часть этих вопросов нами сконструирован специальный стенд, позволяющий моделировать варианты фотосъёмки объектов культурного наследия с целью получения 3D-моделей с заданными выходными параметрами, общая компоновка стенда представлена на рисунке 2. На рисунке: *а* – поворотный стол; *б* – стойка для крепления ЦФА; *в* - ЦФА с различной

ориентацией оптической оси;  $z$  – вычислительная платформа для управления стендом и накопления данных,  $d$  – объект съёмки;  $e$  – осветительные приборы.

Достижение максимально возможного пространственного разрешения с глубиной резко изображаемого пространства (ГРИП) порядка  $\pm 150$  мм (на рисунке 2 полусфера серого цвета) относительно центра стола при съёмке с расстояния 1,25 метра достигалось подбором оптимального сочетания параметров



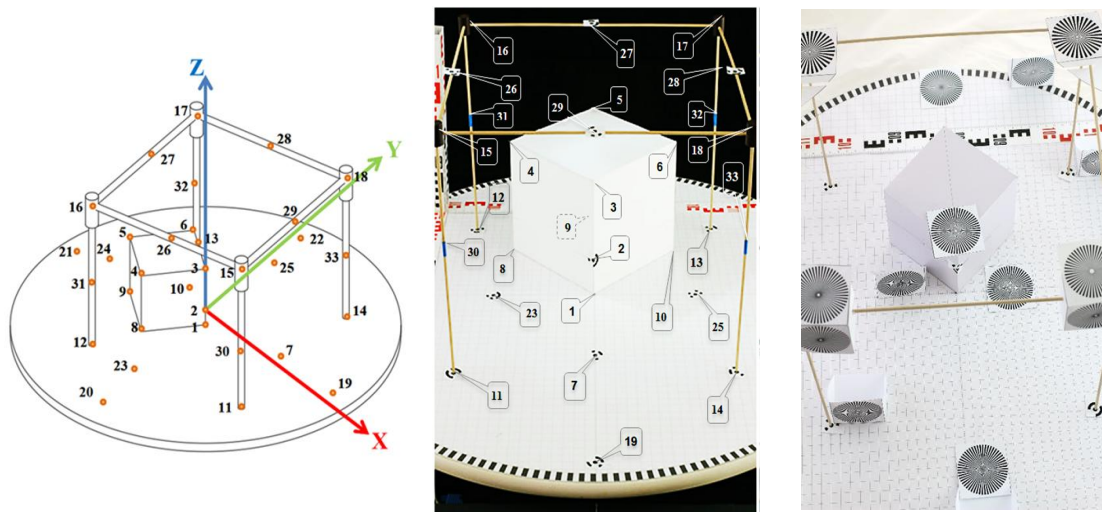
ЦФК при минимальной чувствительности сенсора.

Рисунок 2 – Модель компоновки стенда с осветительными приборами.

Очевидно, что фокусировка производилась однажды для всех камер и фиксировалась «стопорным винтом». Фотограмметрическая и резольвометрическая калибровки камер производились на стенде по специально сконструированному объемному тест-объекту при числе опорных точек не менее 20 в совокупности с набором радиальных миш для контроля разрешения на модели. Последние позволили установить «критические углы» пересечения проектирующих лучей с поверхностью граней объектов, в которых пространственное разрешение на их поверхности падало в 2 раза и более. При угле наклона проектирующего луча более  $45^\circ$  к плоскости грани объекта падение разрешения становится недопустимо большим - с 0,16 до 0,49 мм, что необходимо брать в расчёт при установке числа точек фотографирования.



Для исследования условий съёмки и выбора настраиваемых параметров предметной фотограмметрической съёмки нами создан пространственный полигон в рабочем объеме станда, реализующий систему контрольных точек и систему пространственных тест-объектов (радиальных мир) для изучения глубины резко изображаемого пространства (ГРИП), что дало возможность оценить линейные ошибки на контрольных точках станда и линейное разрешение в



пределах станда (рисунок 3).

Рисунок 3 – Расположение опорных точек в рабочем объеме станда

В целом это позволило произвести геометрическую и резольвометрическую калибровку рабочего пространства станда. После обработки данных калибровки получены следующие показатели по рабочему пространству станда:

Таблица 3 – СКО по опорным и контрольным точкам в ЦФС Agisoft Metashape

Кол-во точек	Погрешность $\pm X$ (мм)	Погрешность $\pm Y$ (мм)	Погрешность $\pm Z$ (мм)	Погрешность $\pm XY$ (мм)	Общая (мм)	Относит.
Опорные точки						
16	0,19	0,17	0,10	0,25	0,27	1/1000
Контрольные точки						
16	0,16	0,17	0,22	0,23	0,32	1/1000

Наиболее важными параметрами съёмки выделены число маршрутов съёмки -  $T$  и количество точек фотографирования на каждом маршруте -  $n$ . Графоаналитический анализ условий мультисасечки граней и ребер искусственных тест-объектов различной сложности (Платоновых тел) показал, что

съёмку надо проводить с трёх уровней, один из которых ниже «горизонта» по-стаменту ОКН. Поскольку это невозможно, предлагается метод двухмаршрутной съёмки тремя сеансами, два из которых осуществляются при положении объекта «лежа» на двух противоположных гранях, как это показано на рисунке 4:



Рисунок 4 – Положение маршрутов для съёмки ОКН сложной конфигурации

Число точек фотографирования на каждом маршруте получим из соотношения между углом конвергенции  $\gamma$ , линейными размерами объекта  $R$  и расстоянием  $D$  от центра вращения объекта при заданном угле  $\alpha$  и безусловном наличии продольного (углового) перекрытия на объекте не менее 60%, что обеспечит зону перекрытия первого-третьего последовательных снимков в 20% (рисунок 5).

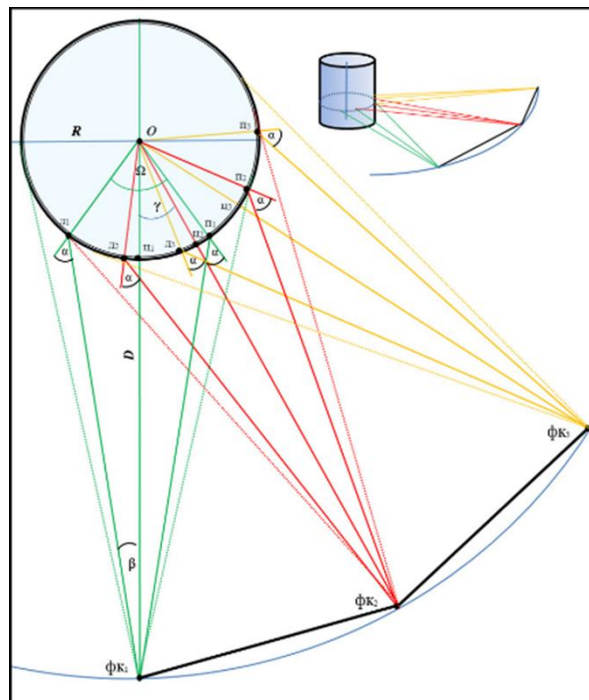


Рисунок 5 – Геометрия многоракурсной стереофотограмметрической съёмки (обозначения в тексте)

Из рассмотрения любого из треугольников, опирающихся на точки  $\phi_k$  – точки фотографирования,  $O$  – центр объекта и точку  $L_i$  или  $\Pi_i$  по теореме синусов имеем:

$$\sin\beta/R = \sin(180 - \alpha)/D, \quad (3)$$

А половина «эффективного угла» поля зрения будет вычисляться:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{R \cdot \sin(180^\circ - \alpha)}{D}\right). \quad (4)$$

Следовательно, угол охвата «эффективной зоны» изображения объекта:

$$\Omega = 2 \cdot (a - \beta) \text{ или } \Omega = 2 \cdot \left[ a - \arcsin\left(\frac{R \cdot \sin(180^\circ - \alpha)}{D}\right) \right]. \quad (5)$$

Угол конвергенции для заданного продольного перекрытия  $p$ :

$$\gamma = \Omega \cdot \frac{(100 - p)}{100}, \quad (6)$$

а количество снимков согласно выражению:

$$n = k \cdot \frac{360^\circ}{\gamma}, \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент, принимающий значения от 1 до 2 в зависимости от сложности рельефа и текстуры поверхности модели.

На основании результатов экспериментальных съёмок объектов сложных конфигураций нами предлагается увеличение углового тройного перекрытия до 50%, что достигается за счет увеличения продольного перекрытия до 75%. Для используемого в работе стенда ( $D=1250$  мм с объектом радиусом 100 мм) при заданном  $\alpha = 45^\circ$  получаем:

$$\Omega = 2 \cdot \left[ 45^\circ - \arcsin\left(\frac{100 \cdot \sin(135^\circ)}{1250}\right) \right] = 80,2^\circ, \quad \gamma = 0,25 \cdot \Omega = 20^\circ, \quad n = 18$$

Показано, что необходимо учесть еще одно условие по установке шага съёмки, связанное с возможными существенными перепадами «рельефа» на поверхности ОКН. Было установлено, что в моделируемых объектах музейной коллекции могут быть глубокие ниши или провалы, глубина которых может достигать 80% от общего линейного размера ОКН. Так, при размере ниши 25 мм и её глубине в 240мм, угол входа в такую нишу можно оценить из выраже-

ния:  $\theta = \arctg(25/240) \approx 6^\circ$ . Это означает, что шаг съёмки должен быть увеличен с  $20^\circ$  (18 снимков) до  $6^\circ$  (60 снимков), что повлечет увеличение тройного перекрытия до 70%.

На рисунке 6 представлена блок-схема, отражающая основные этапы реализации прилагаемой методики съёмки, что является уточнением первого блока технологии создания 3D-моделей ОКН (рисунок 1). Жирным шрифтом указаны ключевые этапы расчётов и выбора параметров съёмки, определяющие качество будущей модели ОКН

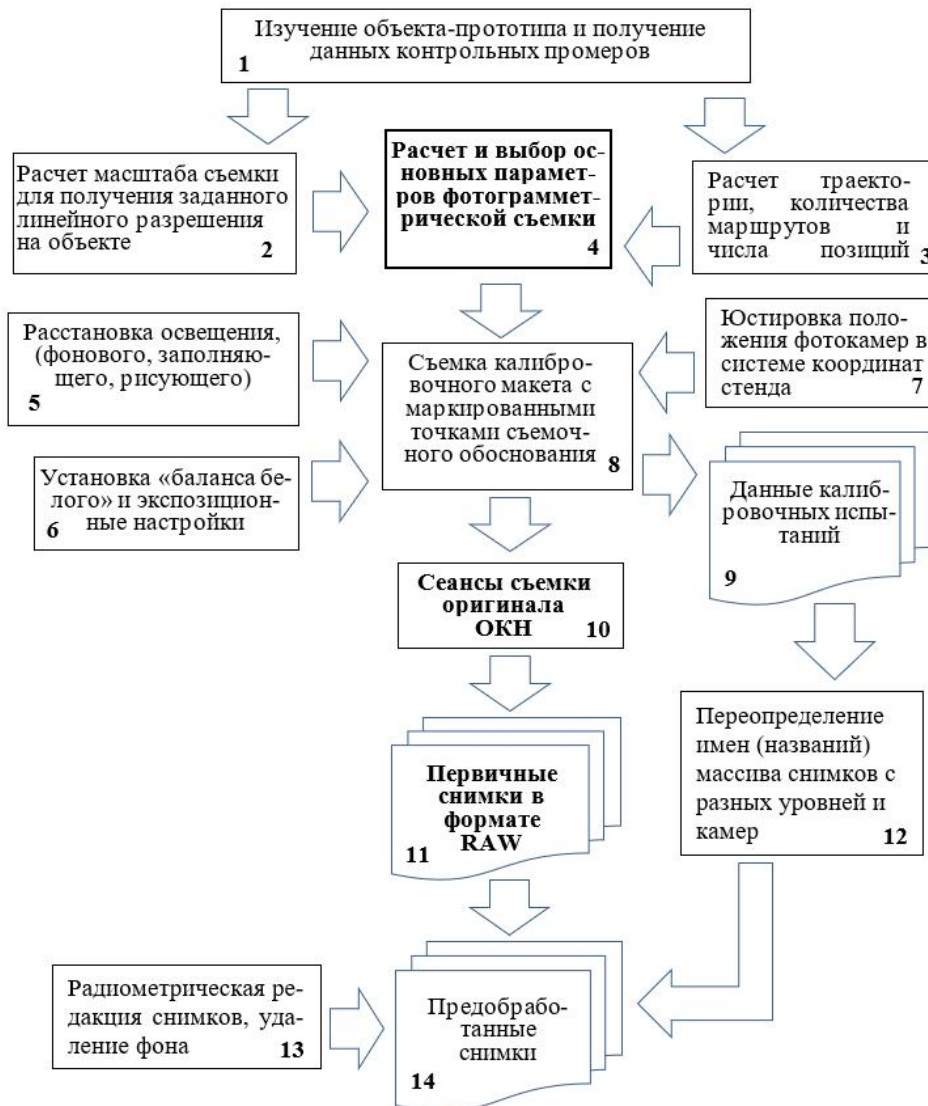


Рисунок 6 – Составляющие методики фотограмметрической съёмки ОКН музейных коллекций

В четвертом разделе «Экспериментальные исследования методики получения цифровых моделей ОКН в археологии, музейном деле» изложены основ-

ные результаты проведенных экспериментальных съёмок с целью верификации предложенной методики съёмки ОКН для целей создания трёхмерных моделей экспонатов музейных коллекций и артефактов. На экспериментальном стенде, описанном выше, были апробированы различные варианты съёмки ОКН: от несложных по форме с простой структурой поверхности до многогранных с глубокими проемами и разнообразной текстурой поверхности размерами до 0,3х0,3х0,3 м.

Для камеральных испытаний с использованием упомянутого ранее стенда был выбран ряд объектов различной сложности, как в плане геометрии, так и в плане текстуры (рисунок 7). Стереофотограмметрическая съёмка проводилась в рамках предлагаемой методики с расчётом параметров разрешения на модели, числа маршрутов и количества снимков внутри маршрута. Экспериментальные работы проводились на стенде для многочисленных реальных ОКН из различных Российских музеев и музея геодезических инструментов МИИГАиК.

Среди объектов из музейной коллекции старинных инструментов МИИГАиК были выбраны образцы, которые имели очень сложную конфигурацию, бликующие, слабо текстурированные, сложно детализированные поверхности, а также подвижные элементы (рисунок 7).

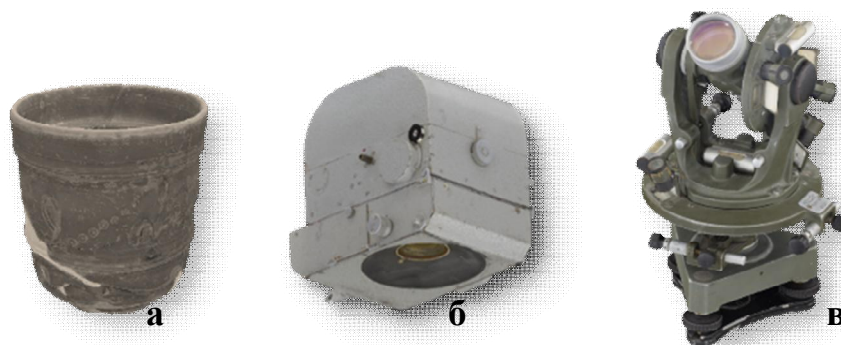


Рисунок 7 – Примеры моделей ОКН различной сложности: а- простая, б – сложная, в – очень сложная

Серия экспериментальных съёмок объектов музейной коллекции геодезического музея МИИГАиК показала технологичность и простоту применения стереофотограмметрического метода с использованием специализированного стенда для реализации «трёхмерной технологии» создания компьютерных моделей ОКН для размещения их в БД. Всего было получено более трёх десятков

моделей объектов музейных коллекций различной степени сложности. В работе подробно описаны особенности процедур создания девяти объектов от самых простых (Платоновых тел) до достаточно сложных предметов из коллекции геодезического музея МИИГАиК.

Геометрическая точность построений модели оценивалась по разности контрольных промеров на модели и объекте прототипе с точностью 0,1 мм. На рисунке 8 и в таблице 4 отображены результаты оценки метрической точности построения модели АФА по контрольным промерам. Трёхмерная модель АФА-М и результаты создания 3D-моделей ОКН других музейных коллекций (более 20 моделей) представлены на портале Sketchfab: [https://sketchfab.com/miigaik\\_af/collections/dissertation](https://sketchfab.com/miigaik_af/collections/dissertation).

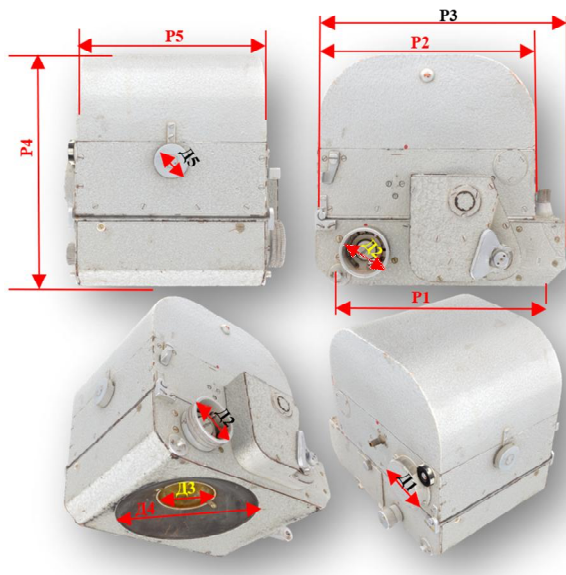


Таблица 4  
Оценка точности по контрольным промерам

№ промера	Описание	Измерение штангенциркуля, мм	Agisoft metashape, мм	Погрешность, мм
1	P1	179,8	179,2	0,6
2	P2	151,0	151,4	-0,4
3	P3	158,4	157,8	0,6
4	P4	168,0	167,2	0,8
5	P5	127,0	127,0	0,0
6	Д1	40,3	40,0	0,3
7	Д2	35,2	34,7	0,5
8	Д3	48,8	49,2	-0,4
9	Д4	111,5	111,6	-0,1
10	Д5	23,0	22,6	0,4
	СКП			±0,3

Рисунок 8 – Результаты оценки метрической точности построения модели АФА

В работе также произведены исследования особенностей существующих форматов хранения информации о трёхмерных моделях в БД. На основании параметров этих форматов и опыта работ других авторов предложены варианты выбора формата хранения моделей в цифровой коллекции, а также структуры хранения данных. Рассмотрены варианты визуализации полученных трёхмерных моделей в веб-среде с возможностью импорта проекта и первичных изображений.

**В заключительной части работы** концентрировано изложены ключевые положения и результаты отдельных её этапов, а также сформулированы основные результаты и выводы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе исследованы вопросы создания трёхмерных моделей объектов ОКН из музейных коллекций для помещения их в цифровые каталоги с целью удалённого доступа к ним научному сообществу и широкому кругу заинтересованных лиц. В рамках диссертационного исследования лично автором получены **следующие научные результаты**:

- решена научная задача разработки методики стереофотограмметрической съёмки объектов культурного наследия из музейных коллекций и компактных памятников архитектуры и археологии;

- теоретически обоснована необходимая точность построения моделей ОКН для целей каталогизации и их хранения в базах данных;

- расширена классификация размерности пространственных данных моделей ОКН, помещаемых в цифровые каталоги для дистанционного доступа и работы с ними неограниченного числа пользователей и специалистов;

- предложены рекомендации по формату и параметрам оптимальной модели хранения информации об объектах культурного наследия в распределённых базах данных с удалённым доступом;

- разработана детальная технологическая схема получения данных съёмки в рамках технологии создания цифровых фотореалистичных и метрически точных моделей ОКН экспонатов музейных коллекций;

- получены практические результаты использования методики при создании цифровых коллекций в ряде Российских музеев с публикацией в глобальной сети.

В дальнейшем предусматривается расширение научно-прикладных исследований в частности:

- а) отработка методики для создания цифровых моделей ОКН малых размеров (3X3X5 см) и крупных памятников (более 2 м) при съёмке с БЛА;

- б) комбинирование фотограмметрического метода и метода оптического сканирования для «сложных» по текстуре и геометрии ОКН;

- в) «перенос» технологии фотограмметрической съёмки в полевую археологию.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Дрыга Д.О., Илюшина Т.В., Севастьянова М.Н. К вопросу создания трёхмерных моделей объектов культурного наследия из музейных коллекций // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2015. – № 4. – С. 118-122.
2. Дрыга Д.О., Алтынов А.Е., Севастьянова М.Н. Методика и технология получения фотореалистичных метрических цифровых моделей предметов музейных коллекций на специализированном стенде // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2017. – № 3. – С. 74-78.
3. Дрыга Д.О., Борисова С.В., Жеребятьев Д.И., Карташов С.А., Мироненко М.С., Тришин И.Г. Сохранение культурного наследия домонгольской Руси: реконструкция утраченных сюжетов каменных рельефов Георгиевского собора XIII века // Историческая информатика. – 2018. – № 3. – С. 51-75.
4. Дрыга Д.О. К методике создания трёхмерных моделей объектов культурного наследия экспонатов музейных коллекций // Известия высших учебных заведений/Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2019. – № 5. т.6 – С. 512-523.

### Статьи в других научных изданиях:

1. Дрыга Д.О., Демидов М.Ю., Жеребятьев Д.И., Королева С.В., Морозова В.И., Пашковский Д.В. Опыт реализации проекта по оцифровке музейных фондов с помощью технологий лазерного сканирования и фотограмметрии для проекта "Портал "Культура РФ"" // сборник: Роль музеев в информационном обеспечении исторической науки сборник статей. – 2015. – С. 412-419.
2. Дрыга Д.О., Малышев А.А. Топогеодезические работы в археологических исследованиях памятников периферии Азиатского Боспора // Археология и Геоинформатика Тезисы докладов. – 2017. – С. 19-20.
3. Дрыга Д.О., Клемешов А.С., Малышев А.А., Смекалова Т.Н. К истории азиатского Боспора в ранневизантийское время: по материалам комплексных исследований Верхнегостагаевского городища // Археология, этнография и антропология Евразии. – 2017. – № 4. – С. 34-44.